

Procjena životnoga vijeka kod umora zavarenih čeličnih konstrukcijskih detalja obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom

Fuštar, Boris

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:974994>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Boris Fuštar

**PROCJENA ŽIVOTNOGA VIJEKA KOD UMORA
ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJSKIH
DETALJA OBRAĐENIH METODOM
MEHANIČKOGA UDARA VISOKOM
FREKVENCIJOM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



University of Zagreb
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Boris Fuštar

**FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF HIGH
FREQUENCY MECHANICAL IMPACT TREATED
WELDED STEEL STRUCTURAL DETAILS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Boris Fuštar

**PROCJENA ŽIVOTNOGA VIJEKA KOD UMORA
ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJSKIH
DETALJA OBRADENIH METODOM
MEHANIČKOGA UDARA VISOKOM
FREKVENCIJOM**

DOKTORSKI RAD

Mentor: doc.dr.sc. Ivan Lukačević

Zagreb, 2023.



University of Zagreb
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Boris Fuštar

**FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF HIGH
FREQUENCY MECHANICAL IMPACT TREATED
WELDED STEEL STRUCTURAL DETAILS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: doc.dr.sc. Ivan Lukačević

Zagreb, 2023.

INFORMACIJE O MENTORU

Mentor: doc. dr. sc. Ivan Lukačević

Ivan Lukačević rođen je u Novoj Gradiški 1983., gdje je stekao osnovno i srednjoškolsko obrazovanje. Nakon završene gimnazije upisao se na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, gdje je diplomirao 2008. na konstruktorskom usmjerenju. Doktorsku disertaciju pod naslovom "Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru" obranio je 2014. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Nakon završenoga dodiplomskog studija ostaje raditi na fakultetu kao asistent - znanstveni novak do 2014., a nakon toga kao poslijedoktorand. 2018. godine izabran je u znanstveno-nastavno zvanje docenta. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu sudjeluje u nastavi na sveučilišnom preddiplomskom i diplomskom studiju od ak. god. 2008./09. iz predmeta: Metalne konstrukcije 1, Metalne konstrukcije 2, Metalne konstrukcije 3, Stabilnost konstrukcija i Pouzdanost konstrukcija, od ak. god. 2009./10. iz predmeta: Primijenjena metalurgija, ak. god. 2014./15. iz predmeta: Betonske i zidane konstrukcije 1., a od ak. god. 2018./19. sunositelj je predmeta Visoke građevine, od ak. god. 2019./20. nositelj predmeta Stabilnost konstrukcija i sunositelj predmeta Pouzdanost konstrukcija, a od ak. god. 2020./21. sunositelj kolegija Metalne konstrukcije 1 i Spregnute konstrukcije. Područje njegovoga znanstvenog i stručnog interesa su metalne i spregnute konstrukcije od čelika i betona te inženjerstvo pouzdanosti. U dosadašnjoj karijeri sudjelovao je u istraživanjima na pet znanstveno-istraživačkih projekata, od kojih na dva kao voditelj te jednoj COST akciji. Objavio je šezdesetak znanstvenih i stručnih radova. U koautorstvu je objavio tri knjige od kojih je jedna na engleskom jeziku, a izdana od inozemnog izdavača te jedan sveučilišni udžbenik. Urednik je jednog zbornika sa znanstvenog skupa, sudjeluje u organizaciji konferencija te je recenzirao pedesetak radova za međunarodne i domaće znanstvene publikacije. Uz raznovrsnu stručnu aktivnost, koja je obuhvatila projektiranje, ekspertize, sudjelovanje u kontroli projekata i aktivno sudjelovanje u programima stručnoga usavršavanja sudjeluje i u radu tehničkih odbora u Hrvatskom zavodu za norme te kao ekspert u radnim grupama Europskog odbora za normizaciju (CEN). Član je nekoliko znanstvenih i stručnih udruga od čega se izdvaja funkcija zamjenika voditelja hrvatske grupe međunarodnog znanstveno-stručnog udruženja IABSE.

IZJAVA O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj doktorski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Boris Fuštar, mag.ing.aedif.

ZAHVALE

Doktorska disertacija rezultat je višegodišnjega kontinuiranoga truda i rada praćenog stresom, sumnjama, krizama i preispitivanjima. Unatoč tome, kada se jedan ovakav pothvat privede kraju, zadovoljstvo se ne može opisati riječima. Ovo nevjerojatno putovanje nikako ne bih mogao završiti bez ljudi koji su uvijek bili i još su tu uz mene.

Na prvome mjestu, veliku zahvalnost dugujem mentoru, doc.dr.sc. Ivanu Lukačeviću. Njegov ogroman angažman i konkretni savjeti su mi bili od velike pomoći te su me uvijek usmjeravali na pravi put. U njemu sam uvijek imao osobu kojoj sam se mogao obratiti s problemom, znajući da ću dobiti pomoć. Takva nesebična pomoć i vodstvo su mi učinili ovo istraživačko iskustvo još zanimljivijim. Veliko hvala na svemu! Također se zahvaljujem i prof.dr.sc Darku Dujmoviću te izv.prof.dr.sc. Davoru Skejiću na savjetima i pomoći tijekom doktorskog studija.

Zahvaljujem svojim roditeljima, Ljubici i Nenadu, koji su mi usadili želju za znanjem i usavršavanjem te na bezuvjetnoj ljubavi i potpori koju su mi u životu pružili. Bez vas ne bih došao ovaklo daleko. Hvala mojoj obitelji i prijateljima na moralnoj podršci i što su uvijek tu za mene. Nasrdačnije hvala mojoj supruzi, Mirjam, koja me pratila u stopu na cijelom ovom putovanju. Zahvalan sam joj na beskrajnoj ljubavi i strpljenju. Također zahvaljujem i svima ostalima koji su na bilo koji način sudjelovali u izradi ove disertacije.

SAŽETAK

Umor je progresivna i lokalizirana pojava postupnog oštećivanja materijala uslijed dugotrajnih ciklički promjenjivih naprezanja. U slučaju zavarenih čeličnih konstrukcija, oštećenja umorom nastaju unutar zavarenih detalja, koji predstavljaju geometrijske i materijalne diskontinuitete. Nagle promjene geometrije uzrokuju visoke koncentracije naprezanja, čime se skraćuje životni vijek zavarenih detalja izloženih djelovanju umora. Proces zavarivanja uzrokuje vlačna zaostala naprezanja u području zavora, koja mogu dodatno skratiti njihov životni vijek. Unatoč brojnim smjericama i preporukama za projektiranje, zadovoljavajući životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru nije uvijek moguće postići. Zbog toga su razvijene metode obrade zavora poput metode mehaničkoga udara visokom frekvencijom koja omogućuje produljenje njihovog životnog vijeka. To se postiže promjenom lokalne geometrije zavora, unošenjem tlačnih zaostalih naprezanja i povećanjem tvrdoće na mjestu obrade. U okviru ovoga istraživanja su razvijeni i kalibrirani deterministički i stohastički proračunski modeli koji omogućuju pouzdanu procjenu životnoga vijeka neobrađenih i obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru. Laboratorijskim ispitivanjima i numeričkim analizama su određeni i analizirani parametri poboljšanja životnoga vijeka zavarenih detalja, a kalibracija modela je provedena na temelju vlastitih laboratorijskih cikličkih ispitivanja.

ABSTRACT

Fatigue in welded steel structures, such as bridge structures, crane runway beams, offshore structures, wind energy supporting structures, etc., is a progressive and localised process of damage accumulation in the material due to cyclic stresses. The magnitude of cyclic stresses is often below the material yield strength. Fatigue damages in steel structures most often occur in geometric and material discontinuities such as welded steel details. Welding affects the material properties, which can cause inhomogeneity within the welds, such as notches, pores, voids etc. Weld also represents a sudden change in the geometry of the detail that causes high-stress concentrations. Welding is performed by melting the base and additional material using concentrated heat, which causes high tensile residual stresses after cooling in the heat-affected zone. Geometrical, material discontinuities and high residual stresses significantly reduce the fatigue life of welded steel details.

There are several methods to increase the fatigue life of such details. Fatigue damage can be avoided by applying lower-stress concentration details or by positioning welds in the lower-stress areas in the structure. High-quality welds without voids and imperfections and full penetration welds can also increase fatigue life. Despite design guidelines, especially in the case of high-strength steel applications, it is not always possible to achieve sufficient fatigue strength. Therefore, Post Weld Treatment methods have been developed, such as the High-Frequency Mechanical Impact method, which can achieve a significant increase in the fatigue life of welded steel details. Fatigue life improvement is achieved by improving the weld geometry, reducing the stress concentration, introducing compressive residual stresses and increasing the hardness at the weld toe. These are the HFMI improvement parameters.

The most common method for fatigue life assessment is the S-N method, which considers the total fatigue life of welded steel details. The fatigue life of steel structures consists of a crack initiation and crack propagation period. While unwelded details show more extended periods of crack initiation, in the welded details, the period of crack propagation has a dominant influence. HFMI treatment extends the crack initiation period of a welded steel detail, so it would be appropriate to consider these two periods separately. This research is based on developing and calibrating deterministic and stochastic calculation models for fatigue life assessment of as-welded and High-Frequency Mechanical Impact treated details. Calculation

models are suitable to consider both crack initiation and propagation separately and provide a reliable fatigue life assessment of the considered details. To develop a reliable model, it is necessary to calibrate it with specific laboratory fatigue tests where all HFMI improvement parameters will be measured on the considered specimens. As-welded and HFMI-treated test specimens were also 3D scanned to obtain a precise geometry of welded steel details. Quality control assurance for HFMI treatment is also conducted. Mechanical properties of the base material were obtained by tensile tests. Residual stresses before and after the HFMI treatment were measured with the X-ray diffraction method. Hardness values on the weld toe were measured by the portable hardness tester. Stress concentration factors were calculated by the finite element analysis considering the geometry obtained by the 3D scanning. After all the already mentioned measurements, cyclic tests with constant amplitudes were performed until the failure of the welded details. These fatigue tests are necessary for the validation of the developed TSM model. The results of the developed and calibrated TSM model show good agreement with the fatigue test results.

In order to expand the knowledge gained on the limited number of cyclic laboratory tests, a stochastic TSM model is used. The stochastic model generates a large number of "virtual tests" calibrated on a smaller number of results obtained by "real" laboratory tests mentioned earlier. In this way, the insights gained from a limited number of samples can be expanded to obtain a broader picture of a number of different stress amplitudes. The stochastic TSM model, by taking into account the uncertainty on the fatigue resistance side, gives more reliable results compared to the deterministic model, which in this case, means more reliable results.

Keywords: Steel structures, fatigue, welded details, High Frequency Mechanical Impact method, HFMI, residual stresses, stress concentration factor, material hardness, calculation model, stochastic model, TSM

KLJUČNE RIJEČI

Čelične konstrukcije, umor, zavareni detalji, metoda mehaničkoga udara visokom frekvencijom, HFMI, zaostala naprezanja, faktor koncentracije naprezanja, tvrdoća materijala, proračunski model, stohastički model, TSM.

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

$2N_f$	broj ciklusa do nastanka pukotine kod Notch strain pristupa
a	dubina pukotine
a_c	kritična dubina pukotine kod otkazivanja
a_i	dubina tehničke inicijalne pukotine
b	ciklički eksponent čvrstoće
C	koeficijent Paris-Erdoganove jednadžbe
c	ciklički eksponent duktilnosti
D	suma oštećenja
E	modul elastičnosti
f_u	vlačna čvrstoća
f_y	granica popuštanja
K	faktor intenziteta naprezanja
k	drugi nagib SN krivulje za promjenjive amplitude
K'	ciklični koeficijent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija
K_t	faktor koncentracije naprezanja
m, m_1	eksponent Paris-Erdoganove jednadžbe i prvi nagib SN krivulje
m_2	drugi nagib SN krivulje za konstantne amplitude
M_k	faktor povećanja zbog koncentracije naprezanja u vrhu pukotine
N	broj ciklusa naprezanja
n'	ciklički eksponent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija
N_c	$2 \cdot 10^6$ ciklusa, po definiciji
N_D	$5 \cdot 10^6$ ciklusa, po definiciji
N_F	broj ciklusa naprezanja do otkazivanja detalja (ukupni životni vijek)
N_i	broj ciklusa naprezanja do nastanka pukotine dubine a_i (period nastanka pukotine)
$N_{\min, HFMI}$	minimalni broj ciklusa gdje HFMI metoda pokazuje učinak poboljšanja
N_p	broj ciklusa naprezanja potrebno za širenje nastale pukotine a_i do kritične vrijenosti a_c kada nastupa otkazivanje detalja (period širenja pukotine)
R	omjer naprezanja ($\Delta\sigma_{\min} / \Delta\sigma_{\max}$)
r	radijus ruba zavora

$S_{C,95\%}$	karakteristična vrijednost otpornosti na umor kod broja ciklusa od $2 \cdot 10^6$
t	debljina elementa
Y	faktor korekcije ovisan o geometriji pukotine
ΔK	razlika faktora intenziteta naprezanja
ΔK_{th}	granični faktor intenziteta naprezanja
$\Delta \sigma$	nominalna razlika naprezanja
$\Delta \sigma_c$	razlika naprezanja pri N_c
$\Delta \sigma_D$	razlika naprezanja pri N_d (granica pri konstantnim amplitudama)
$\Delta \sigma_{nom}$	Nominalna razlika naprezanja
$\Delta \sigma_{eq}$	ekvivalentna razlika naprezanja
$\Delta \sigma_{hs}$	Hot spot naprezanje
ε	relativna deformacija
ε'_f	ciklički koeficijent duktilnosti
σ_E	ekvivalentna razlika naprezanja
$\sigma_{el}, \varepsilon_{el}$	elastično naprezanje i deformacija
σ'_f	koeficijent čvrstoće na umor
σ_m	srednje naprezanje
$\sigma_{pl}, \varepsilon_{pl}$	plastično naprezanje i deformacija
σ_{res}	zaostalo naprezanje

SADRŽAJ

INFORMACIJE O MENTORU	i
IZJAVA O IZVORNOSTI	ii
ZAHVALE	iii
SAŽETAK	iv
ABSTRACT	v
KLJUČNE RIJEČI	vii
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	viii
SADRŽAJ	x
1 UVOD	1
1.1 Motivacija i formulacija problema	1
1.2 Predmet istraživanja, ciljevi i hipoteze	6
1.3 Metode istraživanja	7
1.4 Sadržaj rada	10
2 STANJE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	12
2.1 Uvod	12
2.2 Definicije osnovnih pojmova	12
2.3 Povijest istraživanja umora u čeličnim konstrukcijama	17
2.4 Mehanizam umora materijala	18
2.5 Umor kod zavarenih konstrukcija	22
2.6 Metode obrade zavara	25
2.6.1 Općenito	25
2.6.2 Metoda mehaničke obrade zavara visokom frekvencijom (HFMI metoda)	26
2.6.3 Provođenje HFMI obrade – procedura i kontrola kvalitete	29
2.6.4 HFMI parametri koji utječu na produljenje životnog vijeka	33

2.6.4.1	Promjerna geometrije ruba zavara	33
2.6.4.2	Unos tlačnih zaostalih naprezanja HFMI metodom.....	34
2.6.4.3	Povećanje tvrdoće materijala na mjestu obrade zavara	37
2.7	Procjena životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru	39
2.7.1	Uvod.....	39
2.7.2	S-N metoda.....	39
2.7.2.1	Pristup temeljen na nominalnim naprezanjima.....	42
2.7.2.1.1	Procjena životnoga vijeka kod umora	42
2.7.2.1.2	Utjecaj debljine ploče	45
2.7.2.1.3	Utjecaj kvalitete čelika	45
2.7.2.1.4	Utjecaj opterećenja i omjera naprezanja.....	46
2.7.2.1.5	Naprezanja s promjenjivim amplitudama.....	46
2.7.2.2	S-N pristup temeljen na Hot spot naprezanjima	47
2.7.2.3	S-N pristup temeljen na efektivnom naprezanju u zarezu	51
2.7.3	Dimenzioniranje prema novoj generaciji EN 1993-1-9	53
2.7.4	Metode proračuna perioda nastanka i širenja pukotine kod umora.....	54
2.7.4.1	Uvod.....	54
2.7.4.2	Model za proračun nastanka pukotine – NS pristup	54
2.7.4.3	Model za proračun širenja pukotine – mehanika loma	57
2.8	Pouzdanost kod umora.....	60
2.8.1	Uvod.....	60
2.8.2	S-N metoda.....	61
2.8.3	Mehanika loma	62
2.8.4	Monte Carlo simulacija	63
2.9	Zaključak	65
3	ANALIZA POTOJEĆIH PODATAKA CIKLIČKIH ISPITIVANJA.....	66
3.1	Uvod	66

3.2	Pregled prikupljenih rezultata i statistička analiza	67
3.3	Analiza podataka dobivenih statističkom analizom	71
3.4	Zaključak	75
4	DETERMINISTIČKI PRORAČUNSKI MODEL	76
4.1	Uvod	76
4.2	Razvoj TSM modela.....	77
4.2.1	Period nastanka pukotine, N_i	77
4.2.2	Period širenja pukotine, N_p	81
4.2.3	Dijagram tijeka TSM modela	84
4.3	Primjena, vrednovanje i parametarska analiza TSM modela	85
4.3.1	Uvod.....	85
4.3.2	Primjena i vrednovanje TSM modela.....	85
4.3.2.1	Ciklički materijalni parametri za NS pristup	85
4.3.2.2	Geometrijski i materijalni parametri za mehaniku loma.....	86
4.3.2.3	HFMI parametri za proračun i parametarsku analizu	87
4.3.2.4	Rezultati proračuna TSM modela	88
4.3.3	Parametarska analiza TSM modela	89
4.3.4	Zaključak.....	92
5	EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	93
5.1	Opis eksperimentalnog programa	93
5.2	Izrada ispitnih uzoraka.....	94
5.2.1	Materijal, rezanje ploča i zavarivanje ukrućenja.....	94
5.2.2	Izrada ispitnih uzoraka glodanjem	97
5.3	Obrada uzoraka HFMI metodom.....	98
5.4	Mjerenje geometrije – 3D skeniranje	100
5.4.1	Uvod.....	100
5.4.2	Mjerenje geometrije i analiza podataka	101

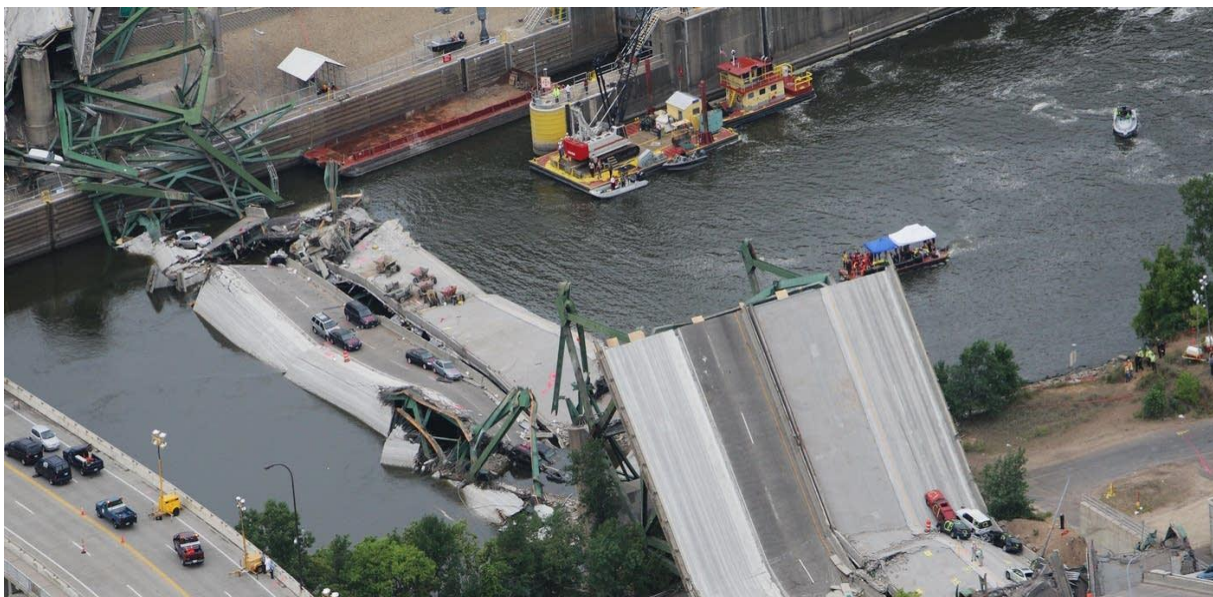
5.5	Ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala	105
5.6	Mjerenje tvrdoće materijala	108
5.7	Mjerenje zaostalih naprezanja	110
5.8	Cikličko ispitivanje uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N	116
5.8.1	Uvod i plan ispitivanja	116
5.8.2	Rezultati ispitivanja	119
5.8.3	Analiza plohe loma	122
5.9	Cikličko ispitivanje uzoraka izrađenih od čelika S690QL	125
5.9.1	Uvod i plan ispitivanja	125
5.9.2	Rezultati ispitivanja	126
5.9.3	Analiza plohe loma	127
5.10	Procjena perioda nastanka i širenja tehničke pukotine	129
5.10.1	Uvod	129
5.10.2	Procjena prema zapisu pomaka čeljusti hidrauličke preše	129
5.10.3	Procjena prema analizi fotografija rubova zavora detalja	131
5.11	Zaključak	142
6	KALIBRACIJA DETERMINISTIČKOGA PRORAČUNSKOGA MODELA	144
6.1	Uvod	144
6.2	Određivanje faktora koncentracije naprezanja	144
6.3	Kalibracija i primjena determinističkoga modela	147
6.3.1	Proračun životnog vijeka detalja izrađenih od čelika S355J2+N	147
6.3.2	Proračun životnog vijeka detalja izrađenih od čelika S690QL	152
6.3.3	Rekapitulacija rezultata proračuna determinističkoga modela	156
6.4	Zaključak	156
7	STOHAŠTIČKI PRORAČUNSKI MODEL	158
7.1	Uvod	158
7.2	Monte Carlo simulacije	159

7.3	Slučaj A - Simulacije cikličkih ispitivanja promatranih detalja	160
7.3.1	Bazne varijable – opterećenje umorom	160
7.3.2	Bazne varijable – Modeliranje perioda nastanka pukotine (N_i)	161
7.3.3	Bazne varijable – Modeliranje perioda širenja pukotine (N_p)	163
7.3.4	Rezultati proračuna stohastičkoga modela (Slučaj A)	163
7.3.5	Kalibracija TSM modela - S690QL detalji s dodatnim ispitivanjima iz literature 168	
7.4	Slučaj B – Simulacije za širi raspon geometrije	172
7.4.1	Uvod	172
7.4.2	Bazne varijable (Slučaj B)	172
7.4.3	Rezultati proračuna (Slučaj B)	173
7.5	Zaključak	179
8	ZAKLJUČAK	181
8.1	Izvorni znanstveni doprinos	181
8.2	Neposredni zaključci	182
8.3	Preporuke za daljnja istraživanja	186
	POPIS LITERATURE	187
	POPIS SLIKA	206
	POPIS TABLICA	212
	PRILOG A – CIKLIČKA ISPITIVANJA IZ LITERATURE	214
	PRILOG B – GEOMETRIJSKI PARAMETRI HFMI OBRAĐENOG RUBA ZAVARA ..	241
	PRILOG C – MAKSIMALNI POMACI ČELJUSTI PREŠE	242
	ŽIVOTOPIS AUTORA S POPISOM OBJAVLJENIH RADOVA	247

1 UVOD

1.1 Motivacija i formulacija problema

Čelične konstrukcije poput cestovnih i željezničkih mostova, nosača kranskih staza, vjetroelektrana itd. su tijekom svoga životnoga vijeka izložene brojnim cikličkim promjenama naprežanja, čija vrijednost ne doseže statičku otpornost konstrukcije. Takve cikličke promjene naprežanja nakon određenog vremena mogu na kritičnim mjestima u konstrukciji uzrokovati oštećenja u obliku nastanka pukotina praćeno njihovim širenjem. Ova se pojava naziva umor materijala i može se definirati kao progresivan i lokaliziran proces u kojem se oštećenje kontinuirano akumulira unutar konstrukcije ili konstrukcijskog elementa. Umor materijala se očituje kroz nastanak i širenje pukotina u konstrukcijskim detaljima te u konačnici može uzrokovati njihovo otkazivanje. Slika 1.1 prikazuje urušavanje mosta I-35W u Minneapolis-u, Minnesota, gdje je i umor materijala imao svoju ulogu u otkazivanju konstrukcije.



Slika 1.1. *Urušavanje mosta I-35W u Minneapolis-u [1]*

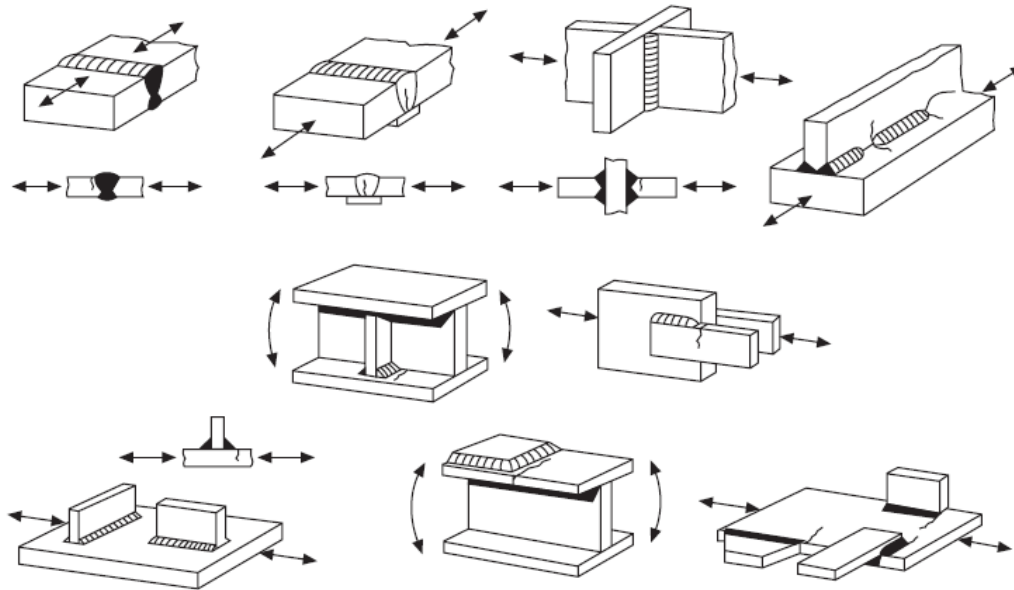
Neiskustvo i nedostatak znanja o ponašanju čeličnih konstrukcija izloženih umoru jedan je od glavnih uzroka ovakvih oštećenja [2]. Studija koju je izradio Oehme [3] pokazuje kako umor kao uzrok otkazivanja čeličnih konstrukcija zauzima visoko treće mjesto, a najčešće konstrukcije koje u tom slučaju otkazuju su mostovi, kako je prikazano u tablici 1.1.

Tablica 1.1. *Prikaz uzroka oštećenja čeličnih konstrukcija prema tipovima konstrukcija*

Uzrok oštećenja (moguće više oštećenja na jednoj konstrukciji)	Ukupno		Zgrade		Mostovi		Transportne trake	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
Statička čvrstoća	161	29,7	102	33,6	19	14,8	40	36,0
Stabilnost	87	16,0	62	20,4	11	8,6	14	12,6
Umor	92	16,9	8	2,6	49	38,3	35	31,5
Pomicanje krutog tijela	44	8,1	25	8,2	2	1,6	17	15,3
Elastična deformacija	15	2,8	14	4,6	1	0,8	0	0
Krti lom	15	2,8	9	3,0	5	3,9	1	0,9
Okoliš	101	18,6	59	19,4	41	32	1	0,9
Toplinsko opterećenje	23	4,2	23	7,6	0	0	0	0
Drugo	5	0,9	2	0,7	0	0	3	2,7
Ukupno	543	100	304	100	128	100	111	100

Umor materijala kao jedan od glavnih uzroka otkazivanja konstrukcija čeličnih mostova se također spominje i u [4,5]. Primjerice, veliki broj postojećih čeličnih mostova danas doseže svoj projektirani životni vijek tijekom kojega su bili izloženi kontinuiranom cikličkom opterećivanju. Više od 60% postojećih željezničkih mostova u Europi je starije od 50 godina, a 30% je starije od 100 godina [6]. U nedostatku preporuka i standarda, procjena životnoga vijeka kod umora se ranije uglavnom nije niti provodila, a ukoliko i je, mjerodavni modeli opterećenja toga vremena su bili znatno manjeg intenziteta opterećenja i frekvencije u odnosu na modele prema današnjim normama, budući da je danas udio teških vozila daleko veći. Navedene informacije ukazuju na povećanu opasnost od otkazivanja umorom ovakvih konstrukcija.

Pukotine kod umora obično nastaju na mjestima nagle promjene poprečnog presjeka, gdje dolazi do lokalnoga povećanja (koncentracije) naprezanja [7]. U slučaju zavarenih konstrukcija, zavari uzorkuju visoke koncentracije naprezanja te su najčešća mjesta nastanka pukotina kod konstrukcija izloženih umoru. Pukotina se iz materijalnih diskontinuiteta mikroskopske veličine može početi širiti već s prvim ciklusom opterećenja. Unatoč tome, zavarivanje je i dalje jedna od najčešćih metoda spajanja čeličnih konstrukcija. Tehnologija zavarivanja nudi inovativna rješenja za projektiranje i mogućnost proizvodnje različitih složenih oblika konstrukcija. Zbog toga su zavari kod čeličnih konstrukcija često neizbježni. Primjeri različitih zavarenih detalja s potencijalnim mjestima nastanka pukotine kod umora prikazani su na slici 1.2.



Slika 1.2. *Primjeri zavarenih detalja u kojima otkazivanje umorom nastaje na mjestima nagle promjene geometrije (koncentracije naprezanja) [8]*

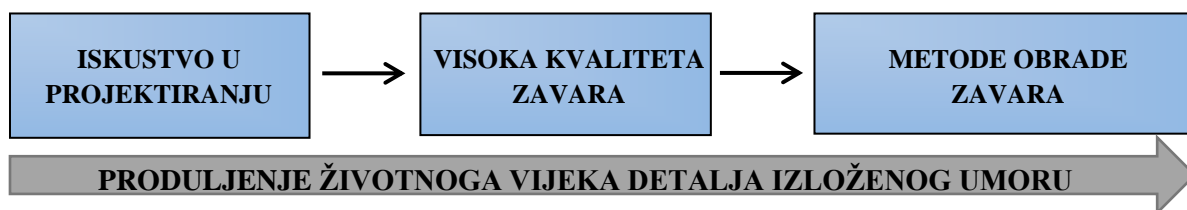
Unutar zavarenih detalja se zbog procesa zavarivanja također pojavljuju i vlačna zaostala naprezanja, kao posljedica lokalnoga skupljanja materijala u okolini zvara nakon hlađenja. Zaostala naprezanja su po definiciji naprezanja koja su nastala unutar konstrukcijskog detalja zbog pojedinog prethodnog djelovanja poput zavarivanja ili hladnog oblikovanja te se zadržavaju unutar elementa i nakon prestanka tog djelovanja. Ova pojava ima negativan utjecaj na životni vijek zavarenog detalja izloženog umoru jer se vrijednost vlačnih zaostalih naprezanja zbraja s vrijednošću vanjskog opterećenja.

Jedna od bitnih razlika između zavarenih i nezavarenih detalja je utjecaj čvrstoće materijala na životni vijek detalja izloženih umoru. Životni vijek nezavarenih detalja obično se povećava s vlačnom čvrstoćom materijala. Međutim, to nije slučaj sa zavarenim detaljima kod kojih, zbog širenja pukotine iz početne nesavršenosti poput zarezata ili pore, otkazivanje umorom ne ovisi o kvaliteti osnovnog materijala [9]. Ovo posebice dolazi do izražaja prilikom korištenja čelika visoke čvrstoće. Njihova primjena ima pozitivan učinak zbog smanjenja vlastite težine konstrukcije, ali u tom slučaju umor postaje vodeće granično stanje, odnosno, granično stanje umora postaje mjerodavno za odabir dimenzija i oblika elemenata poput debljine ploča, ukrućenja i ostale geometrije konstrukcije.

Zbog svega navedenoga, otpornost zavarenih detalja izloženih umoru je i danas jedna od vodećih istraživačkih tema u građevinarstvu u području čeličnih konstrukcija [10]. Kako bi se

povećao životni vijek određene zavarene konstrukcije izložene umoru, moguće je koristiti detalje sa što nižim faktorima koncentracije naprezanja, predviđati zavare u područjima manjih naprezanja itd. Postoje brojne norme i smjernice koje olakšavaju projektiranje čeličnih konstrukcija izloženih umoru [11–14]. Rješavanje problema umora moguće je i povećanjem učestalosti broja pregleda građevine kako bi se na vrijeme otkrila oštećenja nastala umorom, ograničavanjem opterećenja, ojačanjem konstrukcijskih elemenata te zamjenom nepovoljnih detalja iz aspekta umora.

U nekim se pak slučajevima i dalje ne može postići zadovoljavajući životni vijek detalja izloženih umoru. Zbog toga su u zadnje vrijeme razvijene metode obrade zavara (engl. Post Weld Treatment methods) kojima je moguće ukloniti različite nesavršenosti unutar zavara, poboljšati geometriju zavara te unošenjem tlačnih zaostalih naprezanja ukloniti nepovoljna vlačna zaostala naprezanja koja nastaju procesom zavarivanja [15]. Na taj način se postiže dodatno povećanje životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru [10], (slika 1.3). Metode obrade zavara se mogu primjenjivati odmah nakon zavarivanja (nove konstrukcije) ili tijekom eksploatacije (sanacija postojećih konstrukcija), ukoliko zavareni detalji nisu već značajnije oštećeni.



Slika 1.3. Način postizanja visoke otpornosti na umor

Metode obrade zavarenih detalja su jednostavne i učinkovite metode koje u pojedinim slučajevima zbog različitih ograničenja postaju jedini mogući način povećanja životnoga vijeka detalja izloženih umoru. Predmet ovog istraživanja je metoda mehaničkoga udara visokom frekvencijom (engl. *High Frequency Mechanical Impact method, HFMI*). HFMI metoda smanjuje koncentraciju naprezanja na rubu zavara, unosi tlačna zaostala naprezanja na rub zavara te na taj način umanjuje nepovoljna vlačna naprezanja. Zbog hladnoga oblikovanja materijala, lokalno se povećava tvrdoća materijala na rubu zavara, a samim time i lokalna vlačna čvrstoća [16]. HFMI obrada zavarenih detalja izloženih umoru je jednostavna i ekonomična metoda poboljšanja otpornosti zavarenih priključaka, a ponekad može biti i jedino

preostalo rješenje u slučaju kada nije moguće ostvariti dostatni životni vijek klasičnim pravilima projektiranja. Na ovaj način se uklanjaju geometrijske i materijalne nesavršenosti te se produljuje period nastanka pukotine u ukupnom životnom vijeku detalja izloženog umoru [10]. Iako u literaturi postoji veliki broj istraživanja o primjeni ove metode, još uvijek ima dosta nepoznanica koje je potrebno dodatno istražiti [17,18]. Bolje razumijevanje poboljšanja životnog vijeka zavarenih detalja izloženih umoru HFMI metodom dodatno će omogućiti promicanje primjene ove metode u građevinarstvu, strojarstvu i drugim industrijama. Posljedično, omogućit će se napredak normizacije postupka primjene i načina proračuna postojećih i novih konstrukcija poboljšanih ovom metodom.

1.2 Predmet istraživanja, ciljevi i hipoteze

Predmet ovog istraživanja je HFMI metoda, njezin utjecaj na poboljšanje otpornosti (produljenje životnoga vijeka) zavarenih detalja izloženih umoru te razvoj i kalibracija proračunskog modela za procjenu životnoga vijeka neobrađenih (*engl. As-welded, AW*) i HFMI obrađenih zavarenih detalja. Također je istražen i utjecaj HFMI parametara poboljšanja na životni vijek zavarenih detalja obrađenih HFMI metodom. U istraživanju se koriste različite numeričke i eksperimentalne metode s ciljem prikupljanja ulaznih podataka o pojedinim parametrima poboljšanja i baznim varijablama za razvoj i kalibraciju determinističkoga, a potom i stohastičkoga modela za procjenu životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih detalja izloženih umoru. Glavni ciljevi istraživanja su:

- Istražiti stanje područja istraživanja primjene HFMI metode te metoda procjene umora zavarenih detalja.
- Prikupiti i analizirati rezultate dostupnih laboratorijskih ispitivanja iz literature.
- Organizirati, provesti i analizirati vlastita laboratorijska ispitivanja.
- Odrediti parametre HFMI poboljšanja promatranih detalja.
- Razviti, vrednovati i primijeniti deterministički, a potom i stohastički model za procjenu životnoga vijeka HFMI obrađenih detalja.

Hipoteze koje se postavljaju glase:

H1: Kombinacijom metoda koje obuhvaćaju period nastanka i širenja pukotine kod umora moguće je razviti model koji će omogućiti izračun životnoga vijeka zavarenih detalja čeličnih konstrukcija obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom.

H2: Razvijeni stohastički model, koji u sebi sadrži neizvjesnosti parametara poboljšanja metode mehaničkoga udara visokom frekvencijom, omogućit će pouzdanu procjenu životnoga vijeka kod umora obrađenih zavarenih detalja.

1.3 Metode istraživanja

U ovom radu koristile su se sljedeće metode istraživanja:

- Metode statističke obrade podataka
- Eksperimentalno istraživanje
- 3D skeniranje
- Fotogrametrija bliskog dometa
- Metode modeliranja – Numeričke analize metodom konačnih elemenata
- Stohastičke metode

Istraživanje je provedeno kroz sedam faza kako slijedi:

1. Pregled literature

Prva faza istraživanja se odnosi na detaljan pregled, prikupljanje i analiziranje dostupne znanstvene literature s provedenim istraživanjima iz područja umora zavarenih detalja, metoda procjene umora te otpornosti zavarenih detalja izloženih umoru, obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom (HFMI metodom). Iz literature su razvrstane prikupljene činjenice prema relevantnosti te su sintetizirati bitni elementi u obliku odgovarajućih zaključaka.

2. Prikupljanje i analiza postojećih cikličkih ispitivanja

U okviru ove faze su prikupljeni, razvrstani te primjenom metoda statističke obrade podataka analizirani rezultati provedenih eksperimentalnih laboratorijskih cikličkih ispitivanja AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja. Na temelju dobivenih rezultata je istražen utjecaj različitih parametara poput geometrije, kvalitete čelika i uvjeta opterećenja (omjera naprezanja) na životni vijek detalja izloženoga umoru. Prikupljeni i analizirani podaci su korišteni kao osnova za planiranje vlastitih laboratorijskih ispitivanja koji, zajedno s vlastitim ispitivanjima, služe u daljnjem istraživanju za razvoj i vrednovanje determinističkoga, a potom i stohastičkoga teorijskog modela.

3. Razvoj i parametarska analiza determinističkoga proračunskoga modela

Treća faza istraživanja uključuje razvoj modela koji obuhvaća primjenu metoda koje neovisno promatraju period nastanka i period širenja pukotine u ukupnom životnom vijeku konstrukcijskog detalja. Ovaj deterministički model obuhvaća sve HFMI parametre poboljšanja te je vrednovan prema dostupnim podacima ispitivanja iz literature. Kako bi se utvrdili utjecaji pojedinih HFMI parametara poboljšanja, provodi se parametarska analiza modela.

4. Planiranje i provedba laboratorijskih ispitivanja

Treća faza istraživanja se odnosi na eksperimentalne metode, odnosno dizajniranje i izradu uzoraka te laboratorijskih ispitivanja istih u svrhu prikupljanja potrebnih podataka za precizniju kalibraciju determinističkoga modela. Laboratorijski uzorci su izrađeni od tradicionalnog konstrukcijskog čelika S355 i čelika visoke čvrstoće S690, u obliku uzoraka s ukrućenjima, gdje je dio uzoraka obrađen HFMI metodom prema uputama iz smjernica za provedbu i kontrolu kvalitete. Pomoću 3D skeniranja izrađenih i HFMI obrađenih uzoraka kvalitete S355, dobiveni su 3D modeli koji su omogućili preciznu kontrolu kvalitete obrade te preciznu geometriju za izradu numeričkih modela u kasnijim fazama istraživanja. Kako bi se odredile stvarne mehaničke karakteristike osnovnog materijala, provedeno je vlačno ispitivanje uzoraka. Kako bi se dobio uvid u promjenu tvrdoće materijala, na rubovima zavara je izmjerena tvrdoća materijala prije i poslije HFMI obrade. Također su na spomenutim lokacijama prije i poslije obrade izmjerene i vrijednosti zaostalih naprezanja metodom Rendgenske difrakcije. Geometrija zavarenih detalja, tvrdoća i zaostala naprezanja su HFMI parametri poboljšanja otpornosti na umor te su korišteni kao ulazni podaci za deterministički, a potom i stohastički model. U konačnici su provedena i ciklička ispitivanja (ispitivanja na umor) AW i HFMI obrađenih (obrađenih) uzoraka, na hidrauličkoj preši Zwick/Roell - Amsler HB250. Ciklička ispitivanja su provedena pri konstantnim amplitudama na izrađenim LA i TA detaljima. Kako bi se pouzdano odredio kraj perioda nastanka pukotine i početak perioda širenja pukotine, prilikom ispitivanja na dinamičkoj preši, postavljena je digitalna kamera, koja je u određenim vremenskim intervalima fotografirala rub zavara. Nakon provedenog ispitivanja, pomoću zapisa pomaka čeljusti preše i fotogrametrije bliskog dometa je utvrđen kraj perioda nastanka i početak perioda širenja pukotine.

5. Kalibracija determinističkog modela

Četvrta faza istraživanja odnosi se na kalibraciju determinističkoga modela koji sadržava sve izmjerene i analizirane parametre, a vrednuje se vlastitim cikličkim ispitivanjima. Ova faza uključuje i numeričke analize Metodom konačnih elemenata (MKE) u programskom paketu ABAQUS (računalne simulacije), a obuhvaća izradu numeričkih modela uzoraka precizne geometrije na temelju 3D skeniranja uzoraka. Skenirana geometrija je zatim uvezena u program ABAQUS, gdje su proračunati faktori koncentracija naprezanja AW i HFMI obrađenih detalja. Numerički modeli omogućuju proračun vrijednosti faktora koncentracije naprezanja kao jednog od parametara poboljšanja prije i poslije HFMI obrade. Prikazani su usvojeni parametri determinističkoga modela te su prikazani i rezultati proračuna koji su potom potvrđeni laboratorijskim cikličkim ispitivanjima. Također je procijenjen i stupanj povećanja životnog vijeka HFMI obrađenih detalja u odnosu na neobrađene (*engl. As-welded, AW*) detalje. Ovako razvijeni model je podloga za proširenje na stohastičku razinu u sljedećoj fazi istraživanja.

6. Stohastički model

Peta faza istraživanja odnosi se na primjenu probabilističkih metoda teorije pouzdanosti konstrukcija, a uključuje razvoj, vrednovanje i primjenu stohastičkoga modela koji je za pojedine detalje kalibriran prema podacima dobivenim eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima te dostupnim podacima iz literature. Ovaj model omogućuje simulacije životnoga vijeka promatranih detalja za različite razine razlika naprezanja. Osim toga, na ovaj način su spoznaje dobivene na ograničenom broju uzoraka proširene kako bi se dobila šira slika za više različitih konfiguracija detalja i materijala. Razvijeni stohastički model omogućuje pouzdanu procjenu životnoga vijeka kod umora zavarenih detalja poboljšanih HFMI metodom.

7. Analiza rezultata, diskusija i zaključak

U posljednjoj fazi istraživanja su analizirani dobiveni rezultati te je provedena diskusija. Svi zaključci dobiveni kroz pojedine dijelove istraživanja se objedinjuju u ovoj fazi. Na osnovu provedenoga istraživanja, predložene su smjernice za buduća istraživanja koja bi, kao nadogradnja na ovaj doktorski rad, proširila saznanja iz ovog područja.

1.4 Sadržaj rada

Rad je organiziran u 8 poglavlja:

Poglavlje 1. Uvod. Opisuje formulaciju problema, motivaciju za istraživanje problema, predmet rada, hipotezu, ciljeve i metode istraživanja.

Poglavlje 2. Stanje područja istraživanja. Obrađuje stanje područja istraživanja iz područja umora zavarenih detalja, procjene umora te metode mehaničkoga udara visoke frekvencije.

Poglavlje 3. Analiza postojećih podataka cikličkih ispitivanja. Sadrži prikupljene i statistički obrađene podatke ispitivanja zavarenih detalja na umor iz dostupne literature.

Poglavlje 6. Razvoj i vrednovanje determinističkoga modela. Sadrži razvoj, vrednovanje i parametarsku analizu determinističkoga modela „Nastanak-širenje pukotine“ (TSM modela).

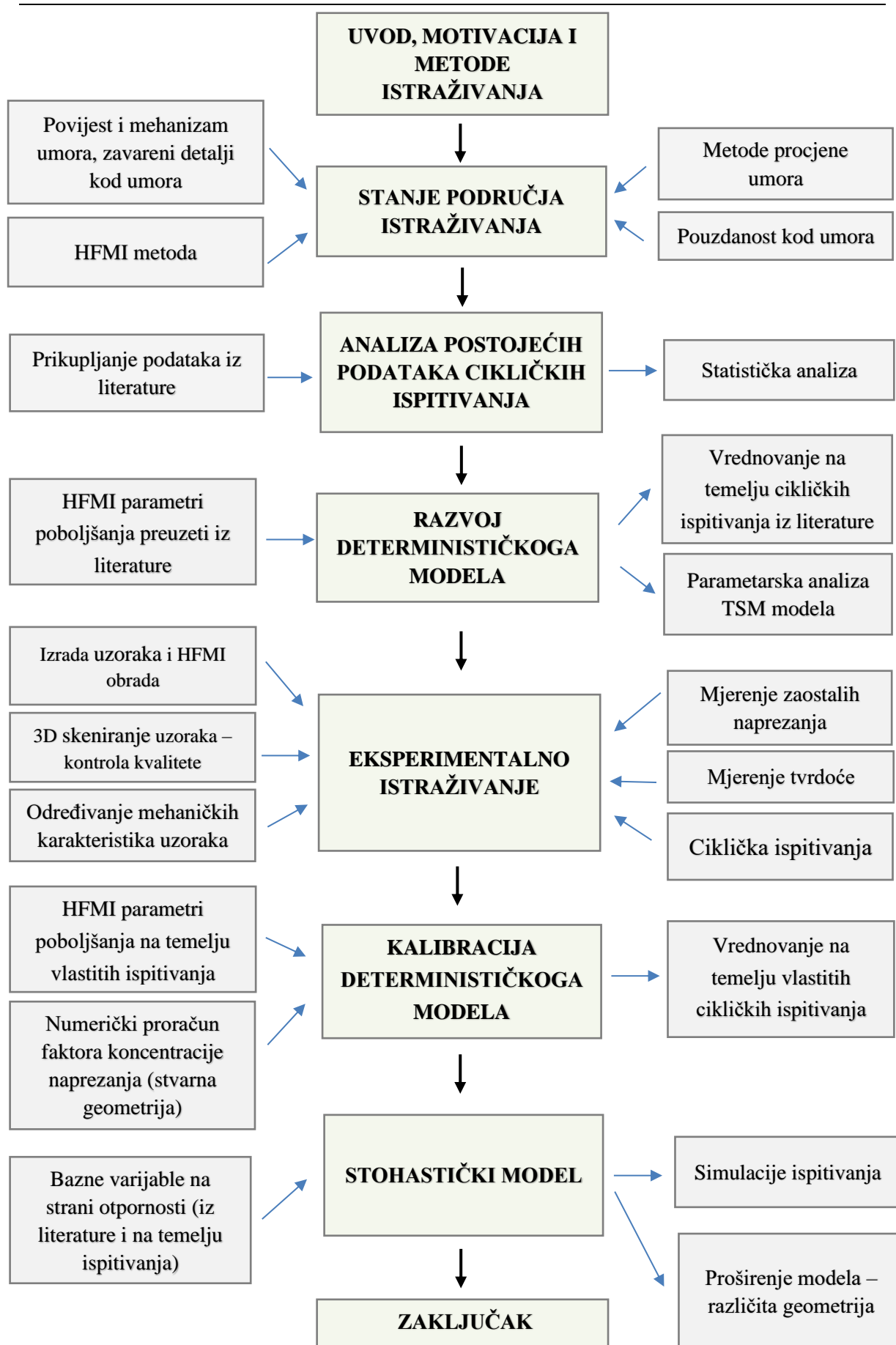
Poglavlje 4. Eksperimentalno istraživanje. Sadrži opis provedenih eksperimentalnih istraživanja u svrhu prikupljanja potrebnih podataka za precizniju kalibraciju determinističkoga modela.

Poglavlje 5. Kalibracija determinističkoga modela. Sadrži numeričko modeliranje promatranih zavarenih detalja te kalibraciju TSM modela obzirom na provedena laboratorijska ispitivanja.

Poglavlje 7. Razvoj, vrednovanje i primjena stohastičkoga modela. Sadrži razvoj i primjenu stohastičkoga TSM modela.

Poglavlje 8. Zaključak. Sadrži izvorni znanstveni doprinos istraživanja, neposredne zaključke, te preporuke za daljnja istraživanja.

Struktura istraživanja prikazana je na slici 1.4.



Slika 1.4. Struktura istraživanja

2 STANJE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

2.1 Uvod

U ovom poglavlju prikazan je pregled stanja područja istraživanja umora zavarenih čeličnih konstrukcija. Pregled literature započinje kratkim povijesnim pregledom problema umora te je objašnjen mehanizam umora materijala. Potom su opisane specifičnosti zavarenih detalja izloženih umoru i utjecaj tih specifičnosti na njihov životni vijek. Nakon toga je prikazan pregled stanja područja istraživanja metoda obrade zavara i poboljšanja otpornosti zavarenih konstrukcija na umor, s naglaskom na HFMI metodu. Potom je prikazan pregled metoda procjene umora AW i HFMI obrađenih zavarenih konstrukcija. Na kraju je prikazan kratak osvrt na pouzdanost kod umora te su u konačnici na kraju pregleda stanja područja istraživanja izvedeni određeni zaključci.

2.2 Definicije osnovnih pojmova

- Metoda mehaničkoga udara visoke frekvencije (*engl. High Frequency Mechanical Impact Method, HFMI*)

Metoda mehaničke obrade ruba zavara u zavarenim detaljima koja uzrokuje značajno povećanje otpornosti na umor.

- Umor (*engl. Fatigue*)

Proces nastanka i širenja pukotine kroz konstrukcijski element uslijed djelovanja učestalih promjena naprezanja koja su ispod granice popuštanja materijala.

- Nominalno naprezanje (*engl. Nominal Stress*)

Naprezanje u osnovnom materijalu ili zavaru u blizini moguće pojave pukotine koje je proračunato prema teoriji elastičnosti ne uzimajući u obzir sve učinke koncentracije naprezanja. Može biti normalno, posmično, glavno ili ekvivalentno.

- Zaostalo naprezanje (*engl. Residual stress*)

Stalno naprezanje u konstrukciji koje je uneseno vanjskim djelovanjem te ostaje i nakon prestanka djelovanja. Može nastati uslijed valjanja, postupka rezanja, skupljanja pri zavarivanju, hladnog oblikovanja itd.

- Razlika naprezanja (*engl. Stress range*)

Algebarska razlika između dva ekstrema određenog ciklusa naprezanja.

- Životni vijek kod umora (*engl. Fatigue life*)

Potreban broj ciklusa naprezanja određene amplitude koji uzrokuje otkazivanje konstrukcijskog detalja ili konstrukcije.

- Krivulje otpornosti kod umora ili S-N krivulja (*engl. Fatigue strength curves*)

Kvantitativni odnos između razlike naprezanje i pripadajućeg broja ciklusa do otkazivanja umorom, a primjenjuje se za procjenu umora pojedinih kategorija konstrukcijskih detalja. Prikazuju se u dvostrukom logaritamskom mjerilu.

- Kategorija detalja (*engl. Detail category*)

Numerička oznaka dodijeljena pojedinom detalju za dani smjer promjene naprezanja, kako bi se naznačilo da je krivulja čvrstoće kod umora primjenjiva za procjenu umora. Predstavlja referentnu čvrstoću kod umora $\Delta\sigma_c$ u MPa.

- Granica umora pri konstantnim amplitudama (*engl. Constant amplitude fatigue limit*)

Granična vrijednost razlika naprezanja (normalne ili posmične) ispod kojih neće doći do oštećenja zbog umora u ispitivanjima s jednolikim amplitudama naprezanja. U uvjetima nejednolikih amplituda, sve razlike naprezanja trebaju biti ispod te granice da ne dođe do oštećenja zbog umora.

- "Cut-off" granica (*engl. Cut off limit*)

Granica ispod koje razlike naprezanja računskog spektra ne pridonose proračunatom kumulativnom oštećenju.

- Pouzdanost (*engl. Reliability*)

Sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da ispuni točno navedene zahtjeve uključujući projektirani vijek trajanja, za koji je konstrukcija ili konstrukcijski element dimenzioniran. Pouzdanost se uobičajeno iskazuje probabilističkim izrazima. Pouzdanost podrazumijeva sigurnost, uporabivost i trajnost konstrukcija.

- Osnovne ili Bazne varijable (*engl. Basic variable*)

Dio posebnog skupa varijabli koje predstavljaju fizičku kvantitativnu vrijednost koja karakterizira djelovanja i utjecaje okoliša, geometrijske veličine i karakteristike materijala uključujući karakteristike tla.

- Zavareni detalj (*engl. Welded detail*)

Detalj u konstrukciji koji sadrži zavar kao geometrijski i materijalni diskontinuitet te predstavlja kritičnu komponentu u konstrukciji iz aspekta umora.

- Umor pri konstantnim amplitudama (*engl. Constant amplitude fatigue loading*)

Vrsta opterećenja umorom s pravilnim promjenama naprezanja između konstantnih vrijednosti maksimalnog i minimalnog naprezanja.

- Stopa širenja pukotine (*engl. Crack propagation rate*)

Vrijednost otvaranja pukotine po ciklusu opterećenja.

- Prebrojavanje ciklusa (*engl. Cycles counting*)

Proces pretvorbe zapisa naprezanja u ekvivalentne razlike naprezanja konstantnih amplitude (ekvivalentni spektar naprezanja).

- Ekvivalentna razlika naprezanja (*engl. Equivalent stress range*)

Razlika naprezanja konstantnih amplitude koja je ekvivalentna u pogledu oštećenja umorom kao i pri varijabilnom zapisu razlika naprezanja za jednak broj ciklusa naprezanja.

- Djelovanje umora (*engl. Fatigue action*)

Utjecaj uzrokovan ciklički promjenjivim opterećenjem.

- Čvrstoća kod umora (*engl. Fatigue strength*)

Veličina razlike naprezanja koja vodi do određenog životnoga vijeka kod umora.

- Mehanika loma (*engl. Fracture mechanics*)

Grana mehanike koja se bavi čvrstoćom i ponašanjem elemenata koji sadrže pukotine.

- Minerova suma (*engl. Miner sum*)

Zbroj svih udjela oštećenja umorom uzrokovanih pojedinim razlikama naprezanja iznad “cut off” granice s pripadajućim brojem ponavljanja.

- Opterećenje promjenjivim amplitudama (*engl. Variable amplitude loading*)

Vrsta opterećenja uzrokovana nepravilnim fluktuacijama vrijednosti razlika naprezanja

- Dvostupanjski model “Nastanak-širenje pukotine” – (*engl. Two Stage Initiation-Propagation model, TSM*)

Model procjene umora pomoću kojeg se odvojeno proračunava period nastanka i period širenja pukotine koje čine ukupni životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru.

- HFMI obrađeno stanje (*engl. HFMI treated state*)

Zavareni konstrukcijski detalji obrađeni Metodom mehaničkoga udara visoke frekvencije.

- HFMI žlijeb (*engl. HFMI groove*)

Žlijeb na rubu zavara nastao utiskivanjem materijala Metodom mehaničkoga udara visoke frekvencije.

- Otvrdnuće materijala zbog plastične deformacije (*engl. Strain hardening*)

Povećanje tvrdoće na površini metala zbog plastične deformacije.

- Geometrijski parametri HFMI žlijeba (*engl. Geometrical parameters of HFMI groove*)

Kvantitativne veličine za kontrolu kvalitete HFMI obrade koje se mjere na presjeku okomitom na smjer HFMI obrade (npr. radijus žlijeba, dubina utiskivanja materijala itd.)

- HFMI mjerač (*engl. HFMI gauge*)

Praktični mjerni instrument za mjerenje vrijednosti dubine utiskivanja materijala HFMI obradom kao parametra kontrole kvalitete.

- Neobrađeno stanje (*engl. As-welded state, AW*)

Stanje zavarene konstrukcije ili konstrukcijskog detalja nakon zavarivanja, a prije primjene bilo kakve toplinske, mehaničke ili kemijske obrade.

- S-N metoda (*engl. S-N method*)

Metoda dokaza zadovoljavajuće otpornosti zavarenih detalja izloženih umoru bazirana na određivanju mjerodavne razlike naprezanja unutar zavarenog detalja na strani djelovanja te uspoređivanja s eksperimentalno dobivenim S-N krivuljama sličnih detalja na strani otpornosti. Najčešće se primjenjuje u praksi od svih dostupnih metoda procjene životnoga vijeka kod umora.

- Nominalno naprezanje (*engl. Nominal stress*)

Naprezanje dobiveno pomoću klasične mehanike konstrukcija pod pretpostavkom linearno elastične teorije. Pri tome se zanemaruju lokalni utjecaji koji uzrokuju naglo povećanje (koncentraciju) naprezanja, ali se uzimaju u obzir geometrijske modifikacije koje imaju značajan utjecaj na promjenu naprezanja duž poprečnog presjeka (npr. izrezane rupe).

- “Hot spot” naprezanje

Naprezanje u promatranom točki dobiveno numeričkim modeliranjem ili mjerenjem koje se sastoji od komponenata membranskog naprezanja te naprezanja od savijanja ploče, a isključuje se nelinearna komponenta naprezanja zbog efekta zarezna na rubu zavara.

- Efektivno naprezanje u zarezu (*engl. Notch stress*)

Ukupno naprezanje u dobiveno numeričkim modeliranjem korijena ili ruba zavara sa zarezima određenog referentnog radijusa pod pretpostavkom linearno elastičnog ponašanja materijala.

- Ciklički materijalni parametri (*engl. Cyclic material parameters*)

Mehaničke karakteristike materijala svojstvene za cikličko opterećenje detalja.

- Faktor koncentracije naprezanja (*engl. Stress concentration factor*)

Faktor kojim se uzima u obzir povećanje naprezanja zbog nagle promjene geometrije (npr. rub zavara).

- Linearna regresija (*engl. Linear regression*)

Skup statističkih procesa za procjenu odnosa između ovisne varijable i jedne ili više neovisnih varijabli u gdje se pronalazi pravac koji najbliže odgovara podacima prema određenom matematičkom kriteriju.

- Period nastanka pukotine (*engl. Crack initiation period*)

Potreban broj ciklusa naprezanja određene amplitude koji uzrokuje nastanak tehničke pukotine određene dubine na rubu zavora promatranog detalja.

- Period širenja pukotine (*engl. Crack propagation period*)

Potreban broj ciklusa naprezanja određene amplitude koji uzrokuje širenje tehničke pukotine od početne dubine do kritične dubine kada nastupa otkazivanje detalja.

- Fotogrametrija (*engl. Photogrammetry*)

Fotogrametrija je vještina, znanost i tehnologija dobivanja pouzdanih kvantitativnih informacija o fizičkim objektima procesom zabilježbe, mjerenja, analiziranja i interpretacije fotografskih snimaka.

2.3 Povijest istraživanja umora u čeličnim konstrukcijama

Pojam „umor materijala“ nastao je u devetnaestom stoljeću te se koristio za opis naglog otkazivanja konstrukcije ili konstrukcijskog elementa izloženog ponavljajućem (cikličkom) opterećivanju. Slika 2.1. prikazuje nesreću vlaka u Versaillesu, koja je 1842. uzrokovana naglim otkazivanjem osovina lokomotive uslijed umora materijala [19]. U to doba se još nije razumjelo da akumulacija mnogo malih ponavljajućih ciklusa naprezanja može inicirati pukotinu koja će se širiti i uzorkovati naglo otkazivanje metalnih konstrukcijskih dijelova. Ova nesreća se smatra početkom shvaćanja mehanizma umora materijala i konstrukcija.

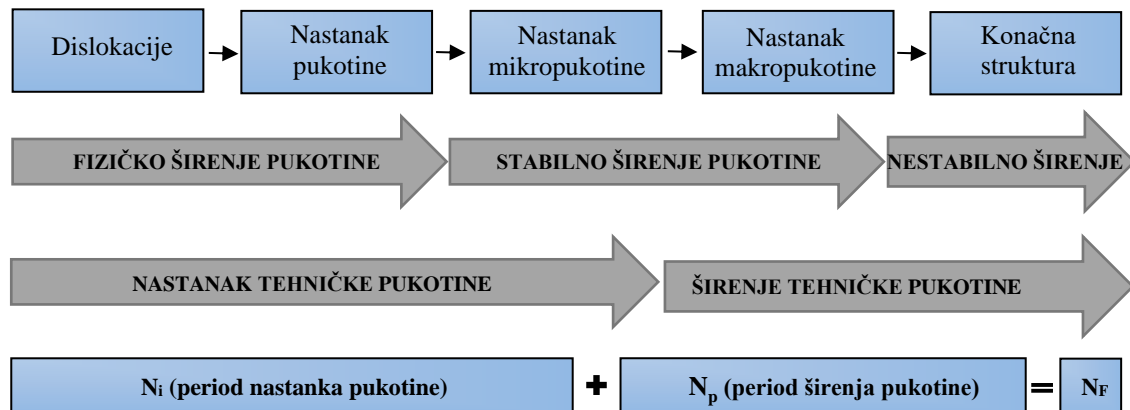


Slika 2.1. *Nesreća vlaka u Versaillesu 1842. uzrokovana umorom materijala [19]*

U dvadesetom se stoljeću saznalo da ponavljano djelovanje na konstrukciju pokreće mehanizam umora materijala, odnosno, nastanak i širenje pukotine što dovodi do otkazivanja konstrukcije ili konstrukcijskog elementa. Pregled povijesti razvoja umora u razdoblju od 1837. do 1994. prikazao je Schütz [20]. Mann [21] je u svoje četiri knjige prikupio 21.075 izvora literature koji se bave problemom umora materijala i konstrukcija u razdoblju od 1838. do 1990. Cui [22] daje pregled metoda procjene umora do 2002. godine te faktora koji utječu na ponašanje materijala i konstrukcija izloženih umoru. Detaljno o mehanizmu umora i svim faktorima koji utječu na otpornost materijala na umor, može se pronaći u knjizi [23]. Od prepoznavanja fenomena umora do danas provedena su brojna istraživanja te je ostvaren značajan napredak u razumijevanju mehanizma umora materijala i konstrukcija te razvoju smjernica za projektiranje i metoda procjena umora. Unatoč tome, ovaj fenomen još uvijek nije u potpunosti istražen.

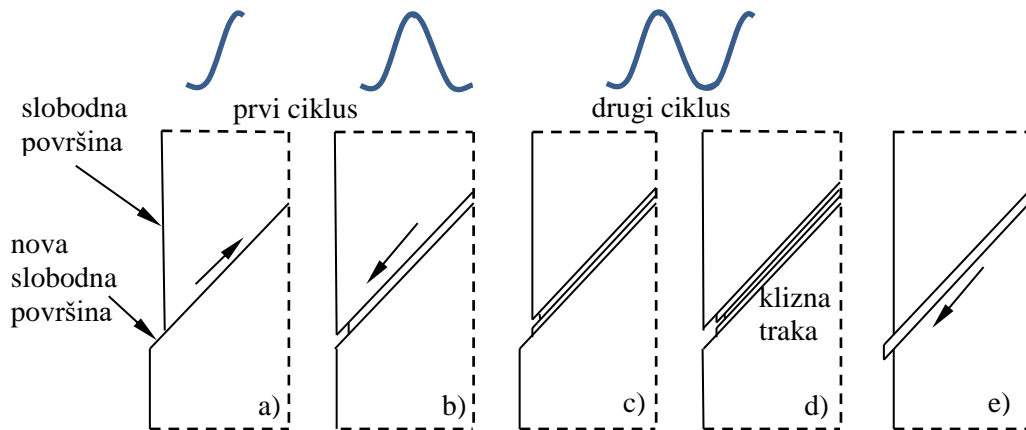
2.4 Mehanizam umora materijala

Životni vijek konstrukcije ili konstrukcijskog elementa izloženog umoru sastoji se od perioda nastanka i perioda rasta pukotine (slika 2.2). Ova dva perioda prvi je prepoznao P.J.E. Forsyth [24], što je jedno od većih postignuća u istraživanju umora u dvadesetom stoljeću.



Slika 2.2. *Različite faze u životnom vijeku kod umora*

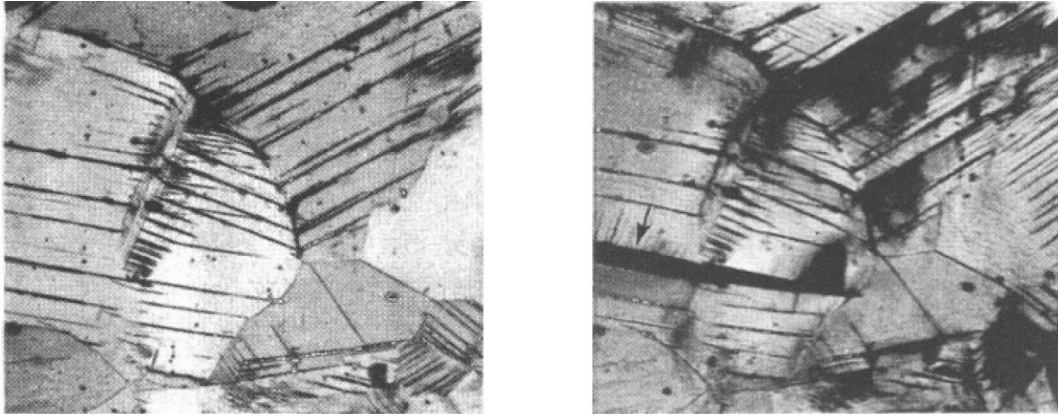
U fazi nastanka pukotine, umor materijala je površinski fenomen. Pukotine kod umora nastaju na površini konstrukcijskog elementa, gdje se oštećenje umorom pojavljuje u obliku mikroskopskih pukotina u kristalografskim kliznim plohama, kao posljedica cikličnog klizanja u kliznim trakama (slika 2.3). Umor nastaje pri amplitudama naprezanja ispod granice popuštanja. Na tako maloj razini naprezanja, plastična je deformacija ograničena na mali broj zrna unutar materijala. Spomenuta mikro-plastičnost lakše nastaje na površini materijala, budući da se materijal koji okružuje to područje nalazi samo s jedne strane, dok je s druge strane zrak ili tekućina, ovisno o okruženju u kojem je konstrukcija smještena. Posljedica toga je ta da je plastična deformacija površinskih zrna manje ograničena nego plastična deformacija zrna ispod površine materijala te se stoga može javiti i pri nižim razinama naprezanja.



Slika 2.3. Cikličko klizanje u kliznim trakama [23]

Cikličko klizanje je uzrokovano cikličkim posmičnim naprezanjem, koje na mikrorazini nije homogeno raspodijeljeno unutar materijala. Posmično naprezanje se u kristalografskim trakastim ravninama razlikuje od zrna do zrna, ovisno o veličinama i oblicima zrna te anizotropiji materijala. U pojedinim zrnima uvjeti za cikličko klizanje na površini materijala su povoljniji nego u ostalim površinskim zrnima. Ukoliko se klizanje događa na površinskom zrnju, mikropukotina će nastati na površini materijala. Na slici 2.3 prikazan je nastanak nove slobodne površine. Klizanje tijekom opterećivanja podrazumijeva otvrdnuće materijala zbog plastičnih deformacija u kliznoj traci. Klizanje u suprotnom smjeru se promjenom smjera opterećenja događa po istoj kliznoj traci (slika 2.3b), gdje će biti prisutno veće posmično naprezanje suprotnog smjera. Ukoliko bi cikličko klizanje bilo potpuno reverzibilan proces, ne bi bilo problema s umorom materijala. Posljedica toga je da klizanje u suprotnom smjeru nastupa duž iste klize trake, ali nastupa i u susjednoj paralelnoj kliznoj ravnini. Isti slijed događaja se može pojaviti i u drugom ciklusu (slike 2.3c i 2.3d).

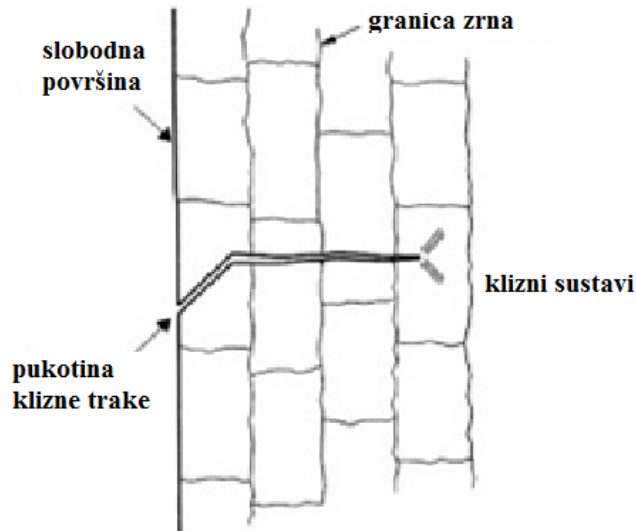
Jedan ciklus je dovoljan za stvaranje mikroskopskog ulegnuća, što zapravo predstavlja mikro pukotinu. Mehanizam koji se javlja u prvom ciklusu se može ponoviti i u drugom ciklusu, a u narednim ciklusima može izazvati širenje pukotine sa svakim ciklusom. Nastajanje mikropukotine se može očekivati neposredno uz kliznu traku, što je potvrđeno brojnim mikroskopskim istraživanjima [23]. Na slici 2.4 (lijevo) klizne trake postaju nakon određenog broja ponavljanja opterećenja mikropukotine, slika 2.4 (desno).



Slika 2.4. Klizne linije (lijevo) i otvorene mikropukotine (desno) [23]

Na slici 2.3 se vidi da pomicanje kliznih ploha tijekom opterećenja i rasterećenja vodi ka utiskivanju materijala. Međutim, ako bi se dogodilo klizanje u obrnutom smjeru, došlo bi do istiskivanja materijala (slika 2.3e). Jednostavni mehanizam utiskivanja na slici 2.3 upućuje na raskidanje veza između atoma unutar materijala, odnosno, javlja se dekohezija materijala (vlačna dekohezija, posmična dekohezija ili kombinacija). Raskidanje veza između atoma se također može pojaviti i na vrhu rastuće pukotine prilikom umora. Za očekivati je da se dekohezija ubrzava unutar agresivne sredine. Ranije je spomenuto da zbog manjih ograničenja pukotina nastaje na površini materijala. Međutim, postoji više čimbenika zbog kojih se to događa. Nehomogena raspodjela napreznja na površini materijala je moguća zbog postojanja zareza ili nekakvog drugog geometrijskog diskontinuiteta, a zbog čega se i vršno napreznje javlja na površini (koncentracija napreznja). Hrapavost površine i korozija također pospješuju nastanak pukotine na površini materijala.

Mikropukotina, koja je reda veličine jednog zrna unutar materijala, doprinosi nehomogenoj raspodjeli napreznja na mikrorazini jer postoji koncentracija napreznja na vrhu mikropukotine. Moguće je aktiviranje i više od jednog kliznog sustava. Ako se pukotina u materijalu širi i preko susjednih zrna, stopa rasta pukotine će se smanjivati budući da susjedna zrna predstavljaju prepreku širenju pukotine. Zbog toga je teško ostvariti klizne pomake unutar samo jednog kliznog sustava. Pomaci se ne mogu više ostvarivati na paralelnim kliznim ploham, već klizne ravnine nastaju u različitim smjerovima. Tada smjer rasta mikropukotine odstupa od početne orijentacije klizne plohe. Općenito, postoji tendencija da mikropukotine rastu okomito na smjer opterećenja (slika 2.5).



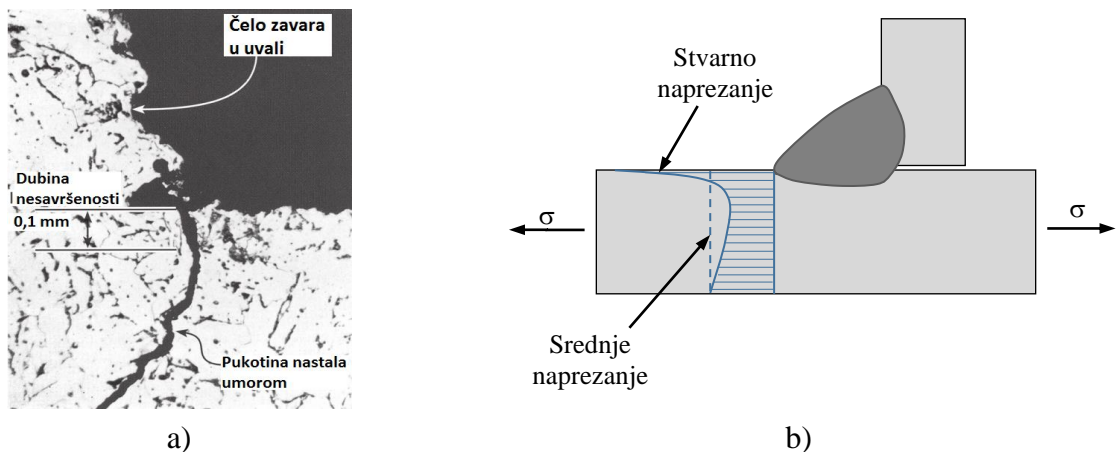
Slika 2.5. Poprečni presjek mikropukotine [23]

Prepreke prilikom klizanja mogu biti granice između zrna unutar materijala. Pukotina u susjednim zrnima ne može rasti u proizvoljnom smjeru i s bilo kojom stopom rasta. Smjer i stopa rasta pukotine ovisi o rastu pukotine u prethodnom zrnju, a to sprječava velike gradijente stope rasta pukotine duž linije pukotine. Kada se pukotina proširi kroz dovoljan broj zrna, rast pukotine postaje više ili manje kontinuiran duž cijele linije pukotine. Tada rast pukotine više nije površinski fenomen. Brzina rasta pukotine sada ovisi o otpornosti materijala na rast pukotine, dok hrapavost površine i ostali površinski uvjeti više nemaju utjecaja.

Prijelaz iz perioda nastanka pukotine u period rasta pukotine još uvijek nije jasno definiran. Definicija se ne može dati kao kvantitativan pojam, ali se koristi sljedeća definicija u kvalitativnom smislu: Period nastanka pukotine prestaje u trenutku kada rast mikropukotine više ne ovisi o uvjetima na slobodnoj površini materijala. To znači da period rasta pukotine započinje u trenutku kada stopu rasta pukotine kontrolira otpornost materijala. Veličina mikropukotine na granici između dva perioda ovisi od materijala, uvjeta opterećenja, konstrukcijskog detalja itd.

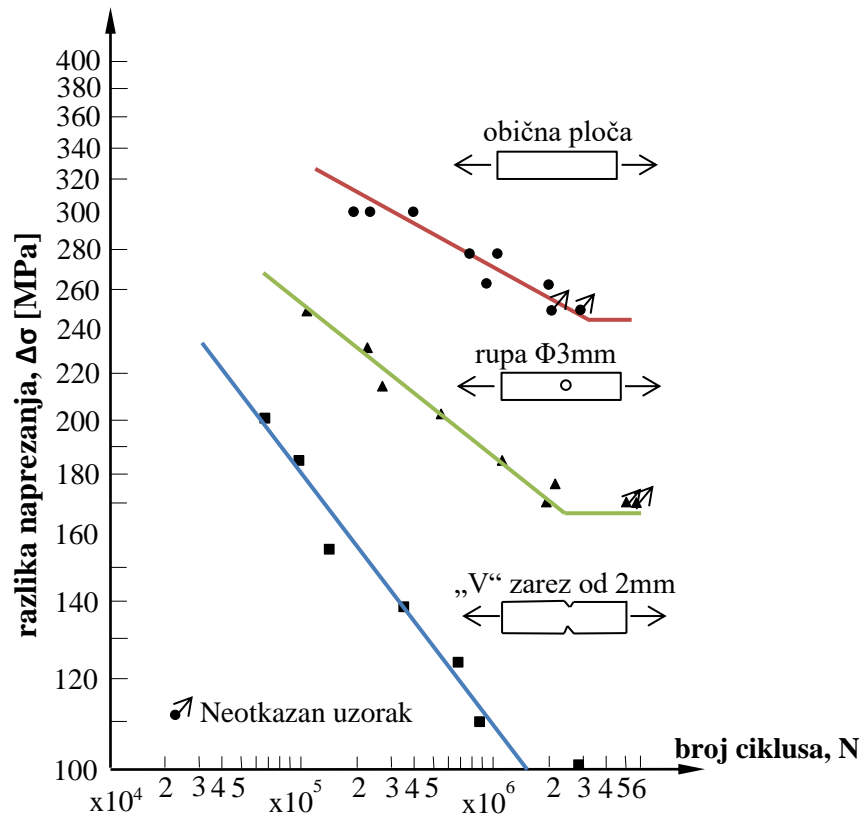
2.5 Umor kod zavarenih konstrukcija

Ranije je zaključeno da je umor materijala i konstrukcija je veoma složen fenomen. Međutim, umor zavarenih konstrukcija je još složeniji zbog samog procesa zavarivanja. Zavarivanje uključuje zagrijavanje i hlađenje, spajanje osnovnog i dodatnog materijala što uzrokuje brojne nehomogenosti, odnosno geometrijske i materijalne nehomogenosti unutar zavora poput zarez, pora, šupljina, nepotpune penetracije te nepotpunog spajanja osnovnog i dodatnog materijala (slika 2.6a). [25]. Zavar predstavlja naglu promjenu u geometriji detalja što uzrokuje nejednoliku raspodjelu normalnog napreznja u elementu, odnosno povećanje ili koncentraciju napreznja, kako je prikazano na slici 2.6b). Zbog svega navedenog, zavareni detalji u odnosu na nezavarene imaju znatno kraći životni vijek kod umora.



Slika 2.6. a) Nesavršenosti unutar zavora, b) povećanje napreznja na mjestu zavora [17]

Utjecaj koncentracije napreznja na životni vijek kod umora konstrukcijske čelične ploče prikazan je S-N krivuljama na slici 2.7 S-N krivulje su prikazane za punu čeličnu ploču, ploču s izbušenom rupom kroz središte te ploču s malim „V“ zarezima urezanim na oba ruba. Sve ploče su istih gabarita te su podvrgnute cikličnom ispitivanju pri istoj razlici napreznja. Na dijagramima je vidljiva značajna razlika u otpornosti na umor ove tri vrste ploča, a najmanja otpornost je u slučaju ploče s „V“ zarezom. Takva ploča na mjestu zarezima ima najizraženiji diskontinuitet na trajektoriji napreznja, što uzrokuje visoke koncentracije napreznja u vrhu zarezima. Ovakve diskontinuitete u zavarenim konstrukcijama predstavljaju zavareni detalji.



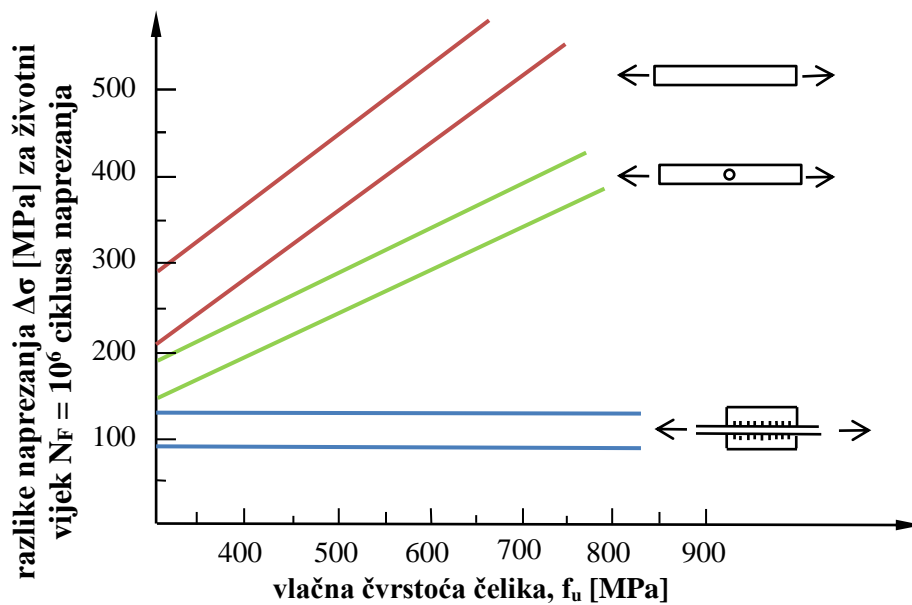
Slika 2.7. Utjecaj koncentracije naprezanja na čeličnu ploču izloženu umoru [8]

Zavarivanje se provodi taljenjem osnovnog i dodatnog materijala pomoću koncentriranog izvora topline. Naglo hlađenje nakon zavarivanja uzrokuje nastanak zaostalih naprezanja u području utjecaja topline te krivljenje elemenata zbog deformacija izazvanih toplinom. Zaostala naprezanja na rubu ili korijenu zavara uzrokuju lokalne koncentracije naprezanja koje se zbrajaju s promjenjivim naprezanjima od vanjskog djelovanja, što dodatno skraćuje životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru [26].

Kao što je već ranije spomenuto, postoje dva perioda u procesu umora, a to su period nastanka i period rasta pukotine. Kod nezavarenih detalja izloženih umoru, većina životnoga vijeka se odnosi na period nastanka pukotine, dok je period rasta pukotine zanemariv [23,27]. Zavari sadrže spomenute nesavršenosti iz kojih pukotine mogu početi rasti već s prvim ciklusom opterećenja. Iz tog razloga je kod zavarenih detalja period nastanka pukotine uglavnom zanemariv, a ukupni životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru ovisi o početnoj veličini nesavršenosti unutar zavara [28].

Otpornosti na umor nezavarenih elemenata se obično povećava povećanjem vlačne čvrstoće materijala. Međutim, ovo nije slučaj i kod zavarenih detalja gdje se pukotina počinje širiti iz

geometrijske nesavršenosti, kako je prikazano na slici 2.6. Ovakvo ponašanje u skladu je s činjenicom da brzina rasta pukotina ne varira značajno u ovisnosti o vlačnoj čvrstoći materijala. Dakle, svaki učinak vlačne čvrstoće na umor odnosi se samo na period nastanka pukotine. Na slici 2.8 u nastavku, prikazan je utjecaj vlačne čvrstoće čelika na otpornost na umor kod zavarenih i nezavarenih detalja.



Slika 2.8. Utjecaj vlačne čvrstoće čelika na otpornost na umor [8]

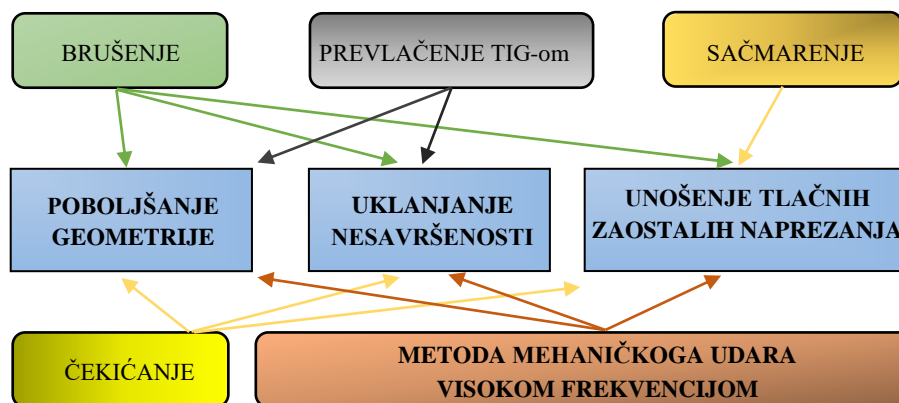
Spomenute specifičnosti zavarenih detalja ukazuju na to da će kod zavarenih konstrukcija izloženih umoru pukotina uvijek nastati na mjestu zavora, a ne u osnovnom materijalu. Pukotine kod umora mogu nastati u korijenu ili rubu zavora. U slučaju sučelnih zavora s potpunom penetracijom, pukotine nastaju na rubu zavora i šire se u osnovni materijal, dok kod nepotpune penetracije pukotine nastaju u korijenu zavora i šire se kroz njegovu debljinu [29].

Ključnu ulogu u procjeni otpornosti zavarenih detalja na umor igra precizna procjena opterećenja i utjecaja geometrije. To je gotovo nemoguće ostvariti bez korištenja naprednih računalnih alata baziranih na metodi konačnih elemenata. Primjeri ovakvog određivanja mjerodavnog opterećenja pri procjenama životnoga vijeka kod umora mogu se pronaći u [30–32]. Razvojem numeričkih metoda nastaju i naprednije metode procjene otpornosti na umor, o kojima će biti riječi u narednim poglavljima.

2.6 Metode obrade zavara

2.6.1 Općenito

Metode obrade zavara utječu na produljenje životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru, a mogu se podijeliti u dvije skupine. Prva skupina se bazira na modifikaciji geometrije ruba zavara gdje se osigurava „blaži“ prijelaz između lica zavara i elemenata koji se spajaju, što smanjuje koncentraciju napreznja na rubu zavara. Na taj se način produljuje trajanje perioda nastanka pukotine u životnom vijeku detalja. Najpoznatije metode iz ove skupine su prevlačenje TIG-om i brušenje, a više o njima se može pronaći u literaturi [33,34]. Druga skupina metoda se bazira na modifikaciji zaostalih napreznja, čime se uklanjaju nepovoljna vlačna napreznja koja nastaju procesom zavarivanja. Ove metode također modificiraju i geometriju ruba zavara pa smanjuju i koncentracije napreznja kao u slučaju prve skupine. Najpoznatije metode ove skupine jesu sačmarenje, čekićanje te zadnje razvijena i sve više korištena metoda mehaničke obrade visokom frekvencijom, tzv. HFMI metoda (engl. High Frequency Mechanical Impact) [10,35]. Slika 2.9 daje pregled mogućnosti obrade ruba zavara obzirom na spomenute metode obrade [35].



Slika 2.9. *Mogućnosti obrade zavara obzirom na metode obrade umor [18]*

U ovom radu se razmatra HFMI (engl. High Frequency Mechanical Impact) metoda koja se svrstava u metode modifikacije zaostalih napreznja, ali se njome također modificira i lokalna geometrija zavarenog detalja te se lokalno povećava tvrdoća materijala na rubu zavara [16].

2.6.2 Metoda mehaničke obrade zavara visokom frekvencijom (HFMI metoda)

HFMI metoda je relativno nova i učinkovita skupina postupaka obrade zavara koja je danas sve popularnija i sve se više koristi u praksi [6, 14]. Početak primjene HFMI metode potječe još iz bivšeg Sovjetskog Saveza [36]. Unatoč svim pozitivnim učincima, implementacija ove metode na velike konstrukcije je relativno spora. HFMI metoda obuhvaća različite postupke poput „*Ultrasonic Peening Treatment*“ (UPT) [37], „*Ultrasonic Impact Treatment*“ (UIT) [38–40], „*High Frequency Impact Treatment*“ (HiFIT), „*Ultrasonic Peening*“ (UP), „*Pneumatic Impact Treatment*“ (PIT) [41] i „*Ultrasonic Needle Peening*“ (UNP) [42]. HFMI metoda može produžiti životni vijek detalja i do 18 puta u usporedbi s AW detaljima [10]. HFMI obrade imaju najveći doprinos kod detalja izloženih velikom broju promjena naprezanja (visoko cikličkom umoru), a primjena HFMI obrade u projektiranju novih konstrukcija može rezultirati lakšim i pouzdanijim konstrukcijama [43].

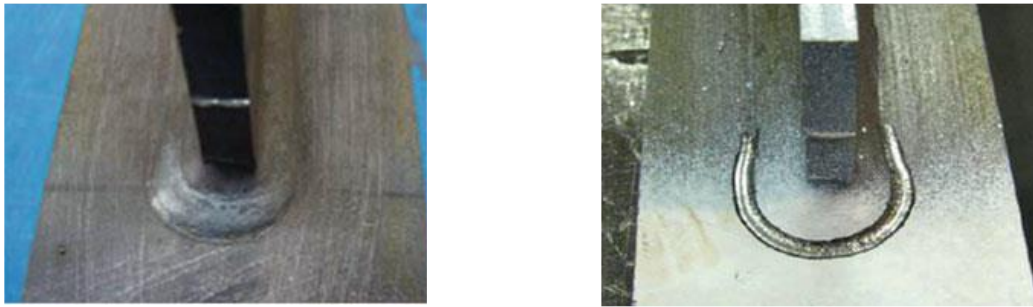
Zadnjih 10-tak godina je razvijen veliki broj komercijalnih uređaja za HFMI obradu te se njihov broj i dalje povećava. Ultrazvučni i pneumatski uređaji se obično sastoje od izvora energije i alata s glavama različitih oblika. Glave su izrađene od čelika visoke čvrstoće te su proizvođači s vremenom prilagodili oblik za što bolji učinak. Slika 2.10 prikazuje primjer HFMI uređaja i glave različitih oblika [15].



Slika 2.10. Primjer HFMI uređaja i različitih dostupnih HFMI glava [15]

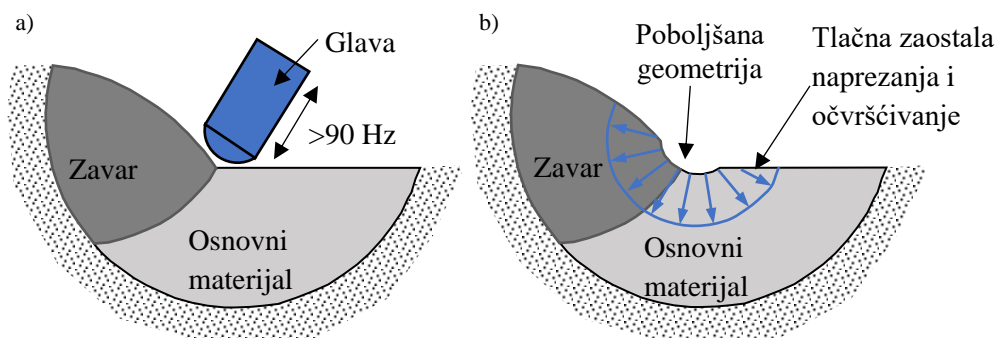
Princip rada HFMI uređaja je taj da izvor energije pod visokom frekvencijom pokreće piezoelektrične elemente, ultrazvučne magnetostriktivne elemente ili komprimirani zrak. Cilindrične glave se oscilirajuće ubrzavaju i udaraju u komponentu konstrukcije (rub zavara) visokom frekvencijom (> 90 Hz). Pozitivan učinak nastaje zbog udarne energije pri svakom

pojedinom udaru koja je određena brzinom (frekvencijom) i pokretnom masom [15]. Slika 2.11 prikazuje AW i obrađeni kutni zavar nakon HFMI obrade.



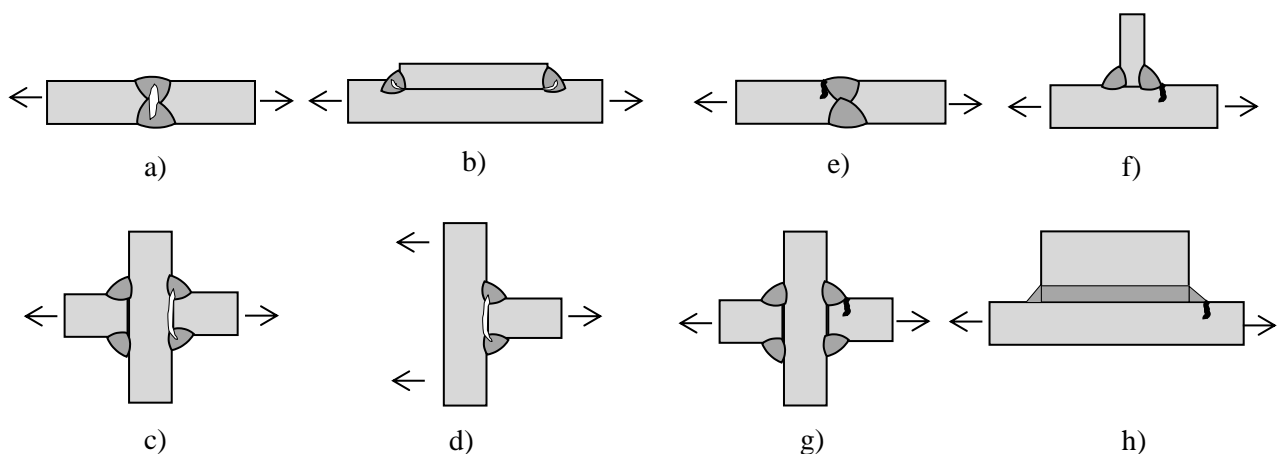
Slika 2.11. AW detalj prije (lijevo) i detalj nakon HFMI obrade (desno) [15]

Prilikom obrade, materijal se lokalno plastično deformira što uzrokuje promjene u mikrostrukturi materijala i lokalnoj geometriji ruba zavara. Također se unose i tlačna zaostala naprezanja čime se smanjuju vlačna zaostala naprezanja što dodatno povećava otpornost na umor zavarenog detalja [41]. Zbog plastičnih deformacija (hladnog oblikovanja materijala) udarcima glave dolazi do otvrdnuća materijala, što lokalno povećava granicu popuštanja i dodatno povećava otpornost ruba zavara na umor [41]. Promjena geometrije, unošenje tlačnih zaostalih naprezanja te povećanje tvrdoće na rubu zavara se nazivaju HFMI parametrima poboljšanja [18,44]. Slika 2.12 prikazuje pozitivan HFMI obradu (lijevo) te navedene HFMI parametre poboljšanja. Nakon što pukotina naraste izvan zone utjecaja HFMI obrade, preostali vijek rasta pukotine je sličan kao i kod AW detalj [16]. Smjernice za provedbu HFMI obrade, kontrolu kvalitete te procjenu poboljšanja otpornosti na umor pomoću nominalnih naprezanja, „hot spot“ naprezanja te efektivnog naprezanja u zarezu „notch stress“ prikazane su u [15].



Slika 2.12. a) HFMI obrada b) parametri HFMI poboljšanja otpornosti na umor [18]

HFMI obrada je primjenjiva samo u slučaju nastanka pukotine na rubu zavora. U slučaju nastanka pukotine u korijenu zavora, HFMI obrada nema učinka. Nakon obrade ruba zavora, postoji mogućnost promjene načina otkazivanja zavarenog detalja u nastajanje i širenje pukotine u korijenu zavora ili iz defekata u osnovnom materijalu. Na taj način neće doći do željenog povećanja otpornosti na umor [45,46]. Primjerice, u radu [47] su ispitivani HFMI obrađeni i AW zavareni detalji pokrovnih ploča (*engl. cover plate*). Uočeno je da u određenim slučajevima pukotina kod obrađenih zavarenih detalja nastaje na mjestu korijena obrađenog zavora, dok kod AW detalja nastaje na rubu zavora. Zbog toga, kada se planira obrada zavora, potrebno je primjenjivati zavare kod kojih neće doći do stvaranja pukotine na mjestu korijena čiji se primjeri mogu pronaći u literaturi [15]. Ako se pak provodi obrada zavarenih detalja koji su osjetljivi na ovu pojavu treba ih prethodno provjeriti eksperimentalnim ili numeričkim analizama. Prikladni i neprikladni zavareni detalji za HFMI obradu prikazani su na slici 2.13.



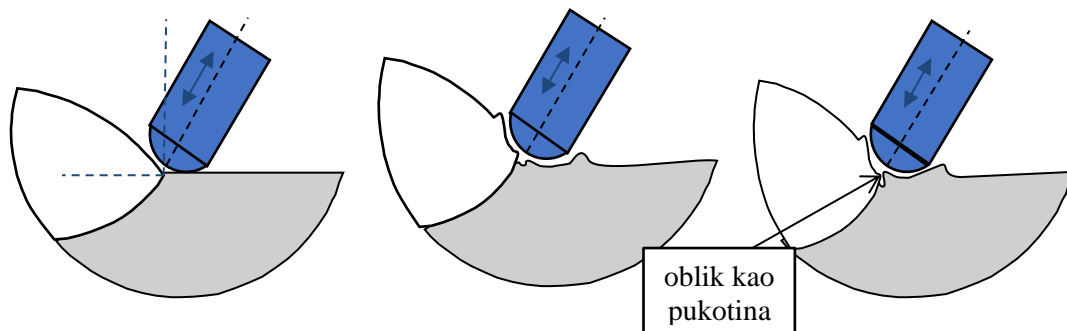
Slika 2.13. Zavareni detalji neprikladni za HFMI obradu – a), b), c), d) i prikladni – e), f), g), h) [15]

Iako se HFMI obrada ranije koristila samo za popravke postojećih konstrukcija, danas je postala dio industrijskog procesa i za nove konstrukcije. Obzirom na sve veću komercijalnu primjenu, javlja se potreba za standardizacijom procesa HFMI obrade i metoda procjene otpornosti na umor [48]. Osnova za razvoj smjernica za procjenu umora kod HFMI obrađenih zavora je bolje razumijevanje svih HFMI parametara poboljšanja i ograničenja koji utječu na stupanj poboljšanja otpornosti na umor. U nastavku je opisan proces provođenja HFMI obrade te kontrola kvalitete, a zatim su opisani HFMI parametri poboljšanja koji utječu na produljenje životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru.

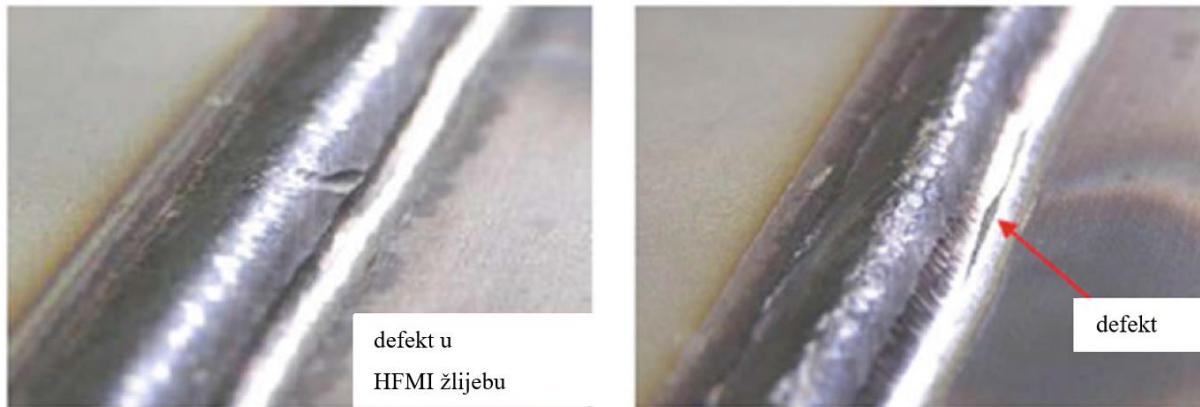
2.6.3 Provođenje HFMI obrade – procedura i kontrola kvalitete

Prije primjene HFMI metode na konstrukciji, potrebno je konzultirati eksperte iz područja umora kako bi se pravilno utvrdile sve kritične lokacije unutar konstrukcije koje treba obraditi. Većina konstrukcija izloženih umoru ima ograničen broj lokacija koje su kritične iz aspekta umora. Pravilna identifikacija ovakvih mjesta je također bitna kako bi se izbjegli dodatni troškovi obrade lokacija koje nisu kritične iz aspekta umora. Budući da se ovom metodom obrađuje rub zavara, treba uzeti u obzir i mogućnost otkazivanja detalja i na drugim lokacijama. Primjerice, ukoliko se ovom metodom samo promijeni način otkazivanja iz ruba zavara u otkazivanje preko korijena zavara, tada se ne postiže značajnija otpornost zavarenog detalja na umor, nego se samo radi o promjeni načina otkazivanja detalja.

Prije same provedbe HFMI obrade, potrebno je dobro očistiti zavar od svih nečistoća i drugih stranih tijela te ga izbrusiti žičanom četkom. HFMI obrada konveksnog profila zavara ili zavara s velikim kutom može prouzročiti da se plastično deformirani materijal preklopi preko originalnog ruba zavara te na taj način ostaviti zarez kao mjesto visoke koncentracije naprezanja. Profil zrna za zavarivanje treba udovoljavati ograničenjima prihvatljivosti za razinu kvalitete zavarenog profila B u ISO 5817 [49] koja se odnose na profil zavara. Ukoliko profil zavara nije sukladan granicama prihvatljivosti, potrebno je lagano brušenje prije HFMI obrade. Brušenje je potrebno pažljivo provoditi jer je na taj način moguće je otežati pravilno detektiranje linije ruba zavara. Ukoliko se neadekvatno obradi rub zavara, neće se očitovati poboljšanje otpornosti na umor. Na slici 2.14 prikazano je formiranje defekta oblika poput pukotine zbog neadekvatnog kontakta između HFMI glave i materijala na rubu zavara, dok je primjer ovakvog defekta, koji se duž HFMI žlijeba očituje kroz tamne linije, vidljiv na slici 2.15.



Slika 2.14. Defekt nastao zbog nepravilnog oblika zavara [15]



Slika 2.15. Defekt koji se očituje kroz tamne linije [15]

Slične nesavršenosti se uočavaju i nepravilnim odabirom HFMI glava te zbog pretjerane obrade, odnosno, prevelikog broja prelazaka uređajem preko istog područja. Ove nesavršenosti su donekle neizbježne, ali ne moraju nužno smanjiti poboljšanje otpornosti na umor. U svakom slučaju, treba izbjegavati pretjeranu obradu ruba zavora, iako su Yekta i suradnici [50] zaključili da je HFMI proces prilično robustan na manje ili veće tretiranje jer se svakako očituje povećanje otpornosti na umor. *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) su razvili uzorke procedura obrade koje mogu poslužiti kao primjeri [51]. Tablica 2.1. prikazuje primjere procedura za dva različita HFMI alata.

Tablica 2.1. Primjer osnovnih parametara HFMI tretmana za dva HFMI uređaja [15]

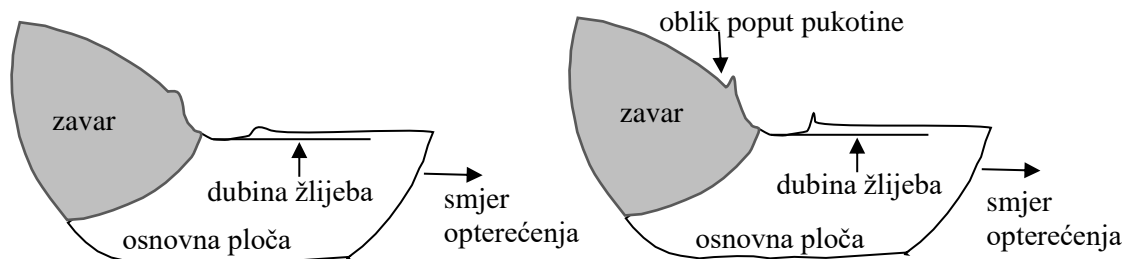
Parametar	HFMI alat	
	Tretman visokom frekvencijom	Ultrazvučni tretman
Izvor napajanja	Pneumatski	Ultrazvučno magnetostruktivni
Broj glava	1	1-4
Kut osi glave u odnosu na površinu ploče, Φ	60°-80°	30°-60°, 40°-80°
Kut osi glave u odnosu na smjer obrade, ψ	70°-90°	90° (svi klinovi moraju biti u kontaktu sa zavarom)
Brzina rada	3-5 mm/s	5-10 mm/s, 5-20 mm/s
Ostalo	-	Vlastita težina alata je dovoljna, minimalno 5 prolaza

Nakon provedbe HFMI obrade se ne smiju provoditi nikakvi dodatni tretmani toplinom zbog mogućnosti umanjavanja ili eliminacije povoljnih tlačnih zaostalih naprezanja unesenih HFMI obradom. Mjere kontrole kvalitete obrade zavora HFMI metodom se dijele na kvantitativne i kvalitativne, a detaljnije su opisane u nastavku.

a) Kvalitativne mjere kontrole kvalitete HFMI procedure

Kvalitativne mjere se odnose na vizualni pregled HFMI žlijeba. Žlijeb mora biti potpuno gladak duž linije obrade. Pravilno obrađeni rub zavora sadrži glatki i sjajni žlijeb bez tamnih linija koje označavaju defekte. Jednostavno povećanje od 3x do 10x s prikladnim osvjetljenjem površine (minimum 350 lx) je dovoljno za procjenu kvalitete HFMI žlijeba. HFMI žlijeb mora biti kontinuiran cijelom potrebnom duljinom obrade. Ukoliko se obrada ne može izvesti bez prekida (dugački zavari ili zavari oko rubova), preporuča se da se prilikom nastavljanja obrade ponovi barem 10 mm prije pozicije zaustavljanja. Slične kvalitativne mjere su propisane i u AASHTO smjernicama [51].

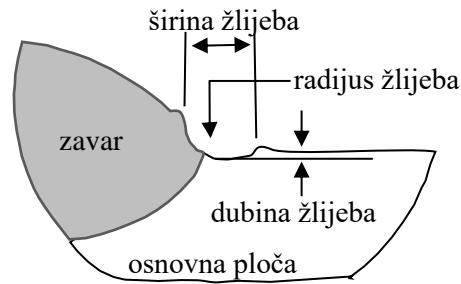
HFMI obrada plastično deformira materijal na mjestu obrade. Ukoliko se HFMI glave pretjerano usmjere u jednu lokaciju, može nastati plastična deformacija u obliku pukotine. Nastanci pukotina ovakvog tipa su u zamijećeni do sada, ali nisu sistematično proučavani [52]. Oblik poput pukotine se u tom slučaju treba ukloniti laganim brušenjem i mora se ponoviti obrada ruba zavora. Slika 2.16 u nastavku prikazuje ispravan (lijevo) i neispravan (desno) profil HFMI žlijeba.



Slika 2.16. *Pravilan presjek HFMI žlijeba (lijevo) i nepravilan profil HFMI (desno) [15]*

b) Kvantitativne mjere

Kvantitativne mjere kontrole kvalitete su dubina, širina i radijus HFMI žlijeba (slika 2.17). Dubina žlijeba je odličan pokazatelj opsega HFMI tretmana. Kod HFMI obrade minimalna dubina žlijeba na rubu zavora mora biti 0,1 do 0,2 mm. Ovisno o granici popuštanja materijala i veličine HFMI glave, optimalna dubina žlijeba iznosi između 0,2 mm – 0,6 mm u dubinu i 3,0 – 6,0 mm u širinu [51,53–55].



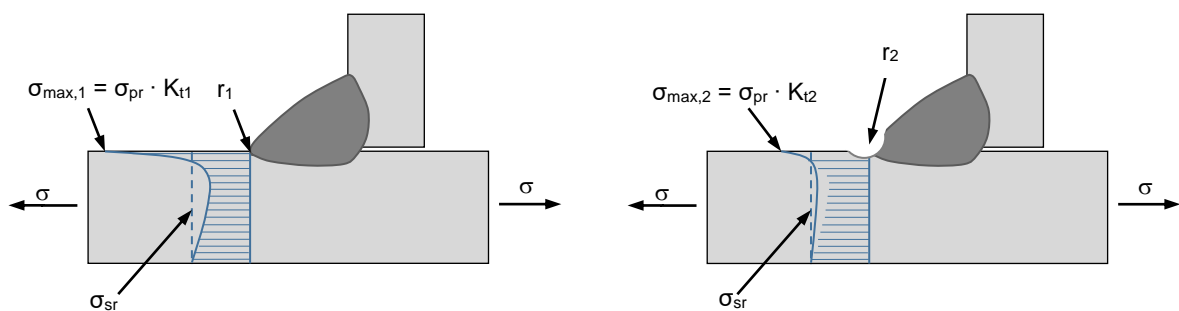
Slika 2.17. Kvantitativne mjere kontrole kvalitete HFMI obrade ruba zavara [15]

Međutim, optimalna veličina HFMI žlijeba nije jedinstvena za sve situacije. Zavareni detalj s relativno dubokim nepravilnostima (engl. *undercuts*) na rubu zavara zahtijeva lagano brušenje ruba vara prije HFMI obrade te će imati dublje žlijebове. S druge strane, u slučaju čelika visoke čvrstoće, žlijeb će biti plići i uži nego kod čelika niže čvrstoće. Dubina žlijeba se može relativno lagano izmjeriti pomoću mjerača dubine (engl. *HFMI gauge*). Centar HFMI žlijeba bi trebao odgovarati liniji spajanja dva materijala. Udio dubine HFMI žlijeba u zavarenom metalu bi trebao biti između 25 % i 75% ukupne širine HFMI žlijeba [54].

2.6.4 HFMI parametri koji utječu na produljenje životnog vijeka

2.6.4.1 Promjerna geometrije ruba zavara

Zavar predstavlja naglu promjenu u geometriji detalja što uzrokuje visoke koncentracije naprezanja, kako je prikazano na slici 2.18. Koncentracija naprezanja se definira faktorom koncentracije naprezanja K_t . Najveća koncentracija naprezanja nalazi se na rubu zavara, koji je iz tog razloga mjesto najvjerojatnijeg otkazivanja umorom. Što je radijus u zavaru manji, koncentracija naprezanja je veća te je u konačnici životni vijek konstrukcijskog detalja kraći. HFMI metoda poboljšava geometriju tako što se povećava radijus ruba zavara ($r_2 > r_1$).



Slika 2.18. Koncentracija naprezanja na mjestu zavara prije i nakon HFMI obrade

Povećanjem radijusa ruba zavara se osigurava „blaži“ prijelaz između lica zavara i osnovne ploče, čime se smanjuje koncentracija naprezanja i povećava otpornost na umor. Kako bi se dobila jednolika geometrija duž zavara, optimalna su tri prolaza HFMI uređajem preko ruba zavara [56].

Faktor koncentracije naprezanja za pojedine detalje je najjednostavnije moguće odrediti analitički (na temelju matematičkih izraza) ili grafički (na temelju različitih dijagrama). Obje navedene metode se mogu pronaći u literaturi [57,58]. Analitički modeli su jednostavne metode za procjenu veličine faktora koncentracije naprezanja te smanjuju vrijeme i troškove numeričkih proračuna. Analitički modeli su u pojedinim slučajevima dovoljni za pouzdanu procjenu faktora koncentracije naprezanja [20]. S druge strane, u slučaju kompleksne geometrije detalja poput HFMI obrađenih detalja, numeričko modeliranje metodom konačnih elemenata predstavlja pouzdanije rješenje za određivanje faktora koncentracije naprezanja. Proračun se u tom slučaju provodi na temelju linearno-elastičnog ponašanja materijala s idealnom geometrijom detalja. Ovakav pristup daje zadovoljavajuću preciznost u većini slučajeva [60]. Primjerice, u slučaju numeričkog proračuna faktora koncentracije AW

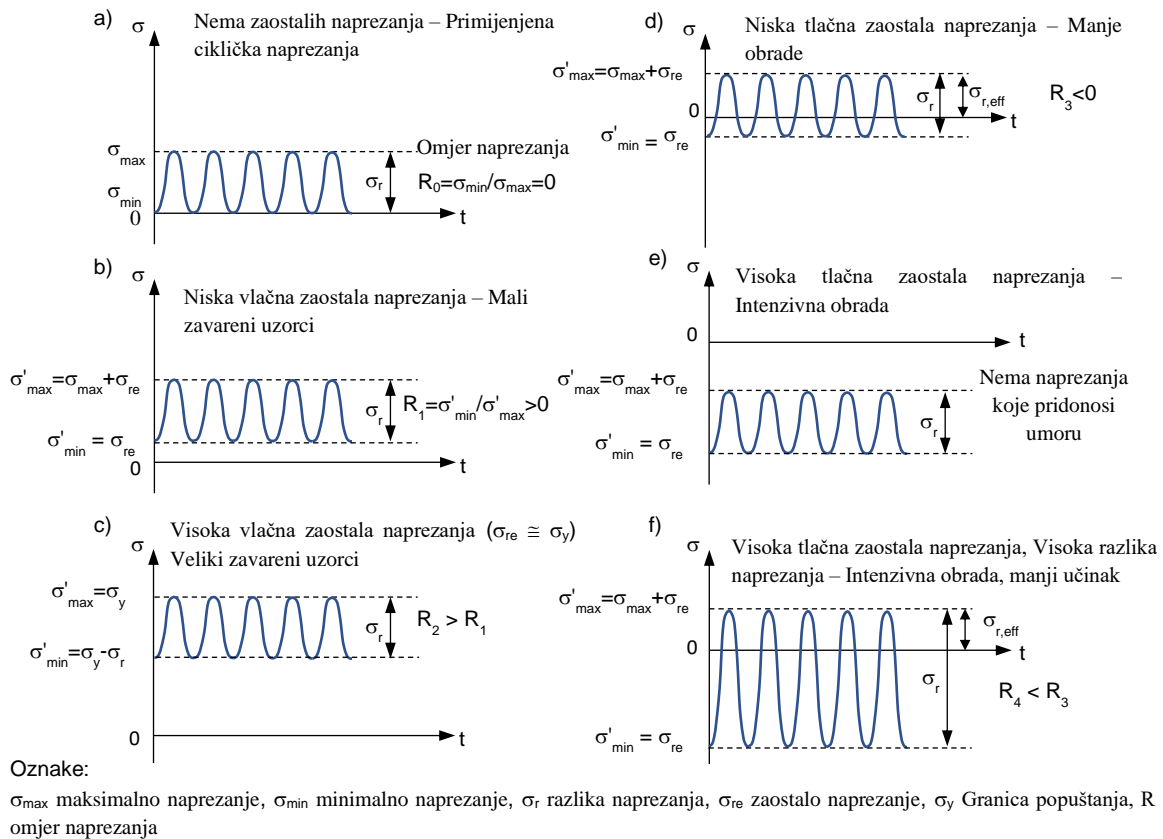
zavarenih detalja s idealnom geometrijom, maksimalno naprezanje na rubu zavora se može idealizirati s radijusom zavora od $r = 1 \text{ mm}$ [61], dok za modeliranje HFMI žlijeba se koristi radijus od $r = 3.3 \text{ mm}$ (dubine $0,2 \text{ mm}$ i širine $3,8 \text{ mm}$) [62]. Ponekad je za precizniji numerički model potrebno koristiti stvarnu geometriju detalja, koju je moguće dobiti 3D skeniranjem promatranih detalja. Više o proceduri i teorijskoj pozadini 3D skeniranja može se pronaći u [63]. Primjer procedure 3D skeniranja i kontrole kvalitete za HFMI obrađene detalje može se pronaći u [64,65]. U [66], uzorci su skenirani u svrhu mjerenja oblika zavora u AW i HFMI tretiranom stanju. Mjerenja geometrije su provedena na temelju 3D skenera koji ima optički mjerni sustav s preciznošću od $0,02 \text{ mm}$.

2.6.4.2 Unos tlačnih zaostalih napreznja HFMI metodom

Zaostala napreznja su napreznja koja su nastala unutar konstrukcijskog detalja zbog pojedinog prethodnoga djelovanja poput zavarivanja ili hladnoga oblikovanja te se zadržavaju unutar elementa i nakon prestanka toga djelovanja. U slučaju zavarivanja, u području ruba zavora se pojavljuju vlačna zaostala napreznja kao posljedica lokalnoga skupljanja materijala u okolini zavora nakon hlađenja. Ova pojava ima negativan utjecaj na period nastanka pukotine kod umora te doprinosi krutom otkazivanju materijala. HFMI obradom se unose tlačna zaostala napreznja koja se zbrajaju s nepovoljnim vlačnim napreznjima na rubu zavora i tako ih umanjuju. Prema nekim autorima [67], ovo je najvažniji parametar poboljšanja kod HFMI obrade. Ukupno napreznje u obrađenom zavarenom detalju iznosi:

$$\sigma_{uk} = \sigma_{vanjsko} + \sigma_{zaost,zavar} + \sigma_{zaost,HFMI} \quad (2.1)$$

Slika 2.19 prikazuje primjer različitih uvjeta napreznja unutar zavarenoga detalja. Omjer napreznja R se definira kao omjer minimalnoga i maksimalnoga napreznja i obično se razlikuje od omjera napreznja od vanjskoga opterećenja.



Slika 2.19. Različiti uvjeti naprezanja unutar zavarenoga detalja obzirom na stanje zaostalih naprezanja [68]

Iz slike 2.19 je vidljivo kako visoka vlačna naprezanja doprinose umoru povećavajući maksimalno naprezanje. Tlačno zaostalo naprezanje uneseno HFMI obradom djelomično ili potpuno umanjuje vlačno naprezanje nastalo zavarivanjem i vlačni dio naprezanja od vanjskoga promjenjivoga opterećenja. Slučaj (e) na slici prikazuje idealni učinak HFMI obrade. Pozitivan učinak HFMI obrade je izraženiji kada je amplituda naprezanja manja. Vlačna naprezanja u kombinaciji s vanjskim opterećenjem mogu povećati vrijednost srednjeg naprezanja i učiniti da je komponenta izložena većem opterećenju nego što u stvarnosti djeluje na tu komponentu. Zbog boljeg razumijevanja stupnja poboljšanja zavara HFMI metodom, zadnjih su godina provedene brojne studije utjecaja HFMI metode na stanje zaostalih naprezanja unutar zavara [69–72].

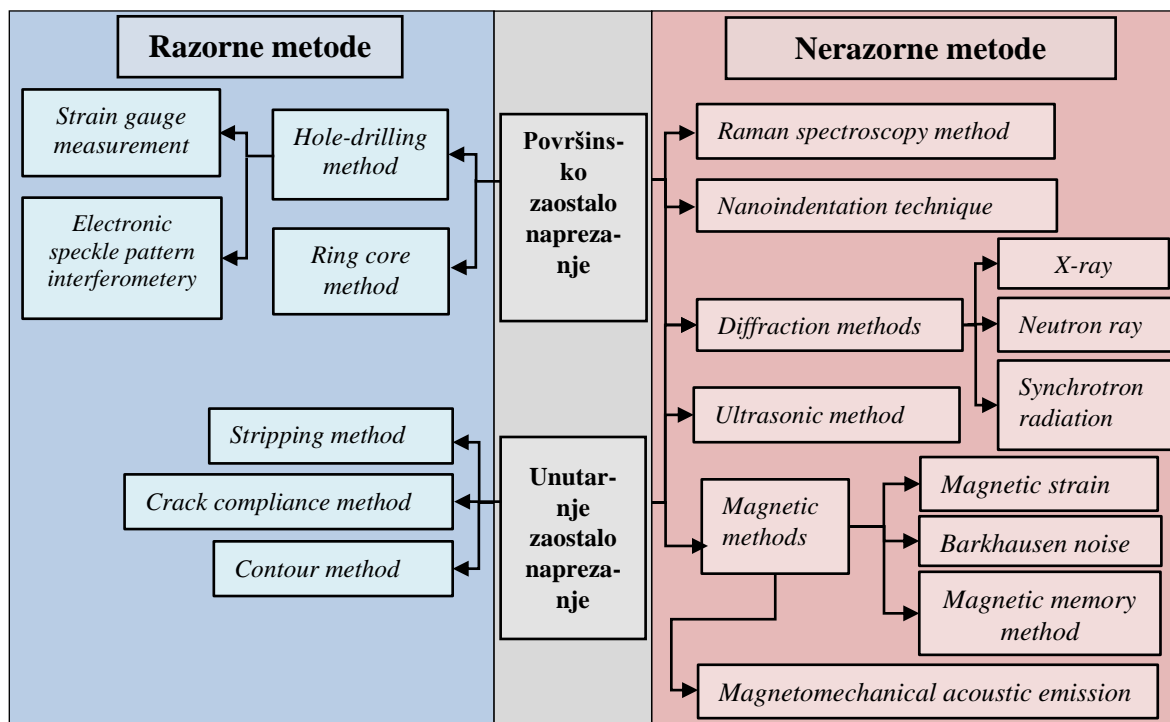
HFMI obrada može unijeti do 400 MPa pozitivnih tlačnih naprezanja do 1,5 mm u dubinu materijala [10]. Veličina unesenih zaostalih naprezanja se povećava povećanjem granice popuštanja materijala [10], što je veoma povoljno kod čelika visoke čvrstoće. Turski i suradnici [69] su pokazali da HFMI obrada u materijal unosi tlačna zaostala naprezanja do dubine od 2

mm, dok su Liu i suradnici [70] utvrdili da tlačna naprezanja sežu čak i do 4 mm u dubinu. Njemački istraživački projekt pod nazivom „*Henry Granjon Prize Competition 2009*“ [73] prikazuje eksperimentalne podatke u kojima tlačna zaostala naprezanja sežu 1,5 – 2,0 mm dubine s maksimalnim vrijednostima na oko 0,4 mm do 0,5 mm ispod površine materijala. Zaostala naprezanja se zadržavaju u području obrađenoga ruba zavara čak i nakon pred opterećenja (poput stalnoga opterećenja), a prije opterećenja umorom [74,75]. Nakon obrade, prosječni radijus zavara iznosi 1,5 mm do 2,0 mm s dubinom žlijeba od 0,1 mm do 0,2 mm. Dubina žlijeba je u bliskoj vezi s lokalnim zaostalim naprezanjima te je bitna mjera u kontroli kvalitete HFMI obrade [64,74].

Zaostala naprezanja unesena HFMI obradom se mogu djelomično ili potpuno opustiti zbog pojedinačnih skokova u naprezanju kao dio uporabnih opterećenja [76–79], što utječe na smanjenje životnoga vijeka zavarenoga detalja kod umora. Takva opterećenja opuštaju zaostala naprezanja proporcionalno njihovoj magnitudi [78]. Na primjer, statičko opterećenje veličine od otprilike 40% nominalne granice popuštanja čelika smanjuje pozitivna tlačna zaostala naprezanja unesena Metodom čekićanja (*engl. Hammer Peening*), koja ima sličan učinak kao HFMI obrada [80]. Stabilnost i opuštanje zaostalih naprezanja kod HFMI obrade detalja ovise o faktorima poput omjera naprezanja i preopterećenja, početne vrijednosti zaostalih naprezanja, lokalne koncentracije naprezanja te lokalne granice popuštanja. Pozitivan učinak kod metoda modifikacije zaostalih naprezanja smanjuje se i povećanjem srednjeg naprezanja [76]. Opuštanje zaostalih naprezanja uglavnom nastaje kod čelika niže čvrstoće opterećenih visokim vlačnim naprezanjem [16,81]. Kod čelika visoke čvrstoće uglavnom nema pojave opuštanja zaostalih naprezanja, već ona ostaju stabilna tijekom cijeloga životnoga vijeka. Kako je ranije spomenuto, ukupno poboljšanje zavara HFMI postupcima očituje se kroz unos tlačnih zaostalih naprezanja, promjenu geometrije zavara te lokalno povećanje tvrdoće. Čak i kada nastupi opuštanje zaostalih naprezanja, poboljšanje otpornosti na umor i dalje postoji zbog preostala dva parametra, ali je u takvim slučajevima potrebno detaljnije istražiti stupanj poboljšanja otpornosti.

Najčešće korišten alat za procjenu zaostalih naprezanja je metoda konačnih elemenata te su zadnje vrijeme razvijani brojni numerički modeli [69–72,82]. Utjecaj tipa mreže konačnih elemenata, karakteristika materijala, rubnih uvjeta, veličina glave i načina modeliranja na dobivene rezultate u numeričkim proračunima mogu se pronaći u [71,83,84].

Simulacije zaostalih naprezanja se eksperimentalno potvrđuju različitim mjernim metodama. Metode za mjerenje zaostalih naprezanja mogu se podijeliti u razorne i nerazorne metode [85]. Razorne metode se temelje na uklanjanju materijala, a vrijednost zaostalog naprezanja se dobiva mjerenjem pomaka ili relativne deformacije. Razvojem tehnologije su se počele više koristiti nerazorne metode koje određuju vrijednost zaostalih naprezanja na temelju fizikalnih svojstava materijala bez njegova uklanjanja. Slika 2.20 prikazuje pregled metoda za mjerenje zaostalih naprezanja. Detaljan opis svake metode te njezine prednosti i nedostaci može se pronaći u [85].



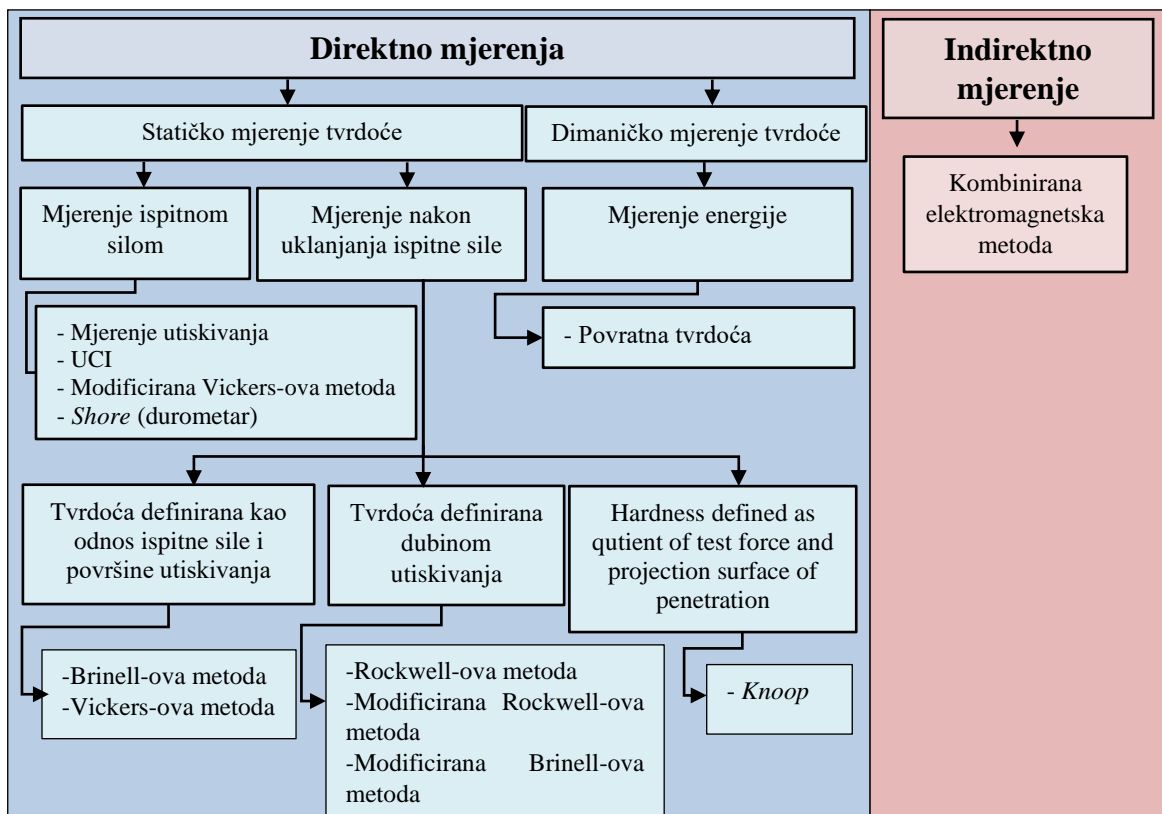
Slika 2.20. Pregled metoda za mjerenje zaostalih naprezanja u materijalima

2.6.4.3 Povećanje tvrdoće materijala na mjestu obrade zavara

HFMI obrada zbog plastičnih deformacija u području obrade (hladnoga oblikovanja materijala) povećava tvrdoću površine materijala u obrađenom području [56], što za posljedicu ima i lokalno povećanje granice popuštanja [56]. Na taj način se povećava i otpornost zavarenoga detalja na umor [16]. Povećanje tvrdoće materijala može iznositi i do 100% u odnosu na AW stanje [80,86]. Dubina otvrdnuća materijala u većini slučajeva iznosi manje od 1 mm. Prema [75] povećanje tvrdoće seže od 0,3 mm do 0,5 mm u dubinu. Povećanje tvrdoće ovisi o kvaliteti čelika pa je kod većih čvrstoća čelika manji potencijal povećanja tvrdoće [73,75]. Weich i suradnici [75] su primijenili HFMI obradu za čelike čvrstoće 434,0 MPa i 719,0 MPa. Kada se

uspoređuju tvrdoće u AW i obrađenom stanju, primjećuje se povećanje u tvrdoći od oko 66% za čelike niže čvrstoće te povećanje od oko 28% za čelike više čvrstoće. Kod čelika niže čvrstoće se primjećuje nešto veća dubina povećanja tvrdoće od oko 0,3 mm - 0,4 mm, dok je kod čelika visoke čvrstoće primijećena dubina od 0,3 mm. Iako je povećanje tvrdoće kod hladnoga oblikovanja čelika poznat fenomen, ne postoji sistematična kvantifikacija ovoga utjecaja za HFMI obrađene detalje [16].

Većina važećih standardiziranih metoda za mjerenje tvrdoće su utvrđene još prije 1930. i do danas su ostale nepromijenjene [87]. Pregled najvažnijih metoda mjerenja tvrdoće materijala prikazan je slikom 2.21 [87]. Najčešće korištene metode u literaturi za određivanje tvrdoće prije i nakon HFMI obrade su Vickers-ova i Brinell-ova metoda. Primjeri mjerenja tvrdoće nakon HFMI obrade mogu se pronaći u [41,88,89].



Slika 2.21. Pregled metoda za mjerenje tvrdoće metala

2.7 Procjena životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru

2.7.1 Uvod

Otkazivanje zavarene konstrukcije izložene umoru se izbjegava dokazivanjem dostatne otpornosti svih zavarenih detalja unutar konstrukcije, koji predstavljaju kritične komponente unutar konstrukcije iz aspekta umora. To se provodi različitim metodama procjene životnoga vijeka kod umora, a u ovom poglavlju je dan pregled najčešće korištenih metoda.

2.7.2 S-N metoda

Najpoznatija metoda za procjenu umora je S-N metoda, u kojoj su implicitno sadržani mnogi složeni mehanizmi i na relativno jednostavan način implicitno uključeni u procjenu ukupnoga životnoga vijeka kod umora [90]. Otpornost detalja predstavlja pripadajuća S-N krivulja, koja se dobiva kao rezultat ispitivanja uzoraka izloženih promjenjivim naprezanjima konstantnih i promjenjivih amplituda. Određuje se kao ovisnost između razlika naprezanja, $\Delta\sigma$ i broja promjena naprezanja, N . Na taj se način dobivaju informacije o otpornosti pojedinoga detalja na umor, s pripadajućom geometrijom, kvalitetom izvedbe, utjecajem okoliša i načinom opterećenja. S-N pristup ne razlikuje eksplicitno nastanak i širenje pukotine, već razmatra ukupni životni vijek konstrukcijskog elementa. S-N krivulje se prikazuju u dvostruko logaritamskom mjerilu (slika 2.22), a analitički izraz S-N krivulje glasi:

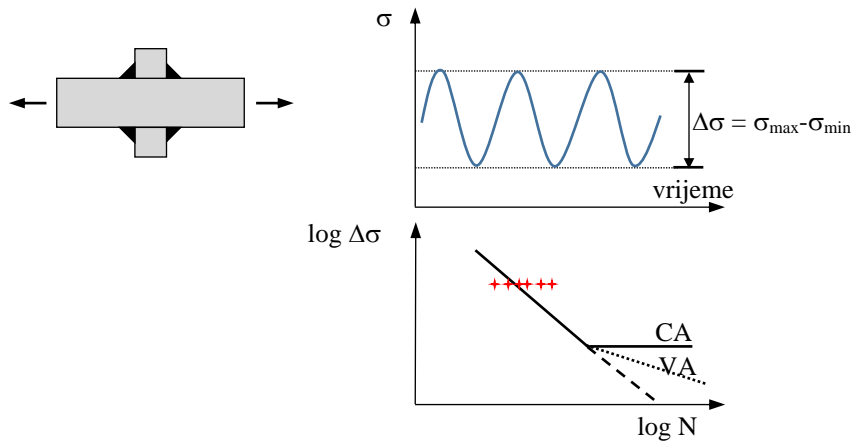
$$\log\sigma = \log\sigma_D + \frac{1}{m} \log \frac{N_D}{N} \quad (2.2)$$

gdje su:

m kut nagiba S-N krivulje

σ vrijednost amplituda koje odgovaraju brojevima promjena naprezanja N

σ_D vrijednost amplitude koja odgovara broju promjena naprezanja N_D

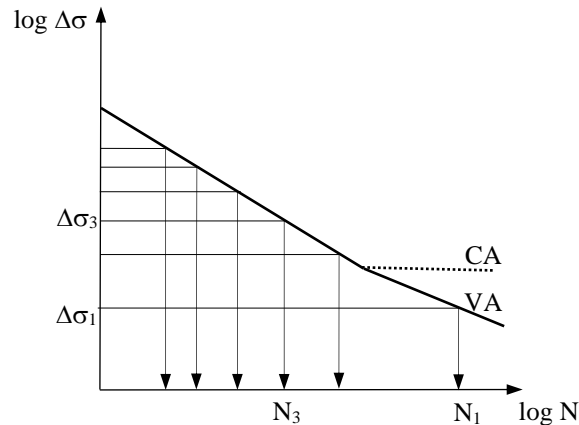


Slika 2.22. Definicije opterećenja i S-N krivulja zavarenih detalja

Iz slike 2.22 je vidljivo da se otpornost na umor smanjuje porastom broja amplituda naprezanja N . S-N krivulja ima određeni nagib do točke koja odgovara granici naprezanja pri konstantnim amplitudama (*engl. constant amplitude, CA*). Pretpostavlja se da je životni vijek zavarenoga detalja izloženoga konstantnim amplitudama naprezanja manjim od ove granice beskonačan, što je prikazano pravcem paralelnim s horizontalnom osi. Autori su danas veoma skeptični oko ove tvrdnje [91]. Ukoliko se ispitivanje provodi dovoljno dugo, svaki bi element u konačnici trebao otkazati. Ovo je posebno izraženo u slučaju konstrukcija koje su izložene jako velikom broju promjena naprezanja. Međutim, ova se pretpostavka u normama ipak usvaja. Prema slici 2.22, pretpostavku granice umora potrebno je modificirati ukoliko je detalj izložen naprezanjima s promjenjivim amplitudama (*variable amplitude, VA*). Konzervativni pristup bi bio ukoliko bi se granica umora zanemarila i usvojila jedna linija s konstantnim nagibom do horizontalne osi, što je na slici prikazano crtkanom linijom.

Kao što je već spomenuto, S-N krivulje se baziraju na podacima ispitivanja dobivenim uglavnom pri konstantnim amplitudama, dok su u stvarnosti detalji izloženi naprezanjima s promjenjivim amplitudama. Kako bi se iz zapisa naprezanja dobile potrebne amplitude naprezanja, potrebno je koristiti neku od metoda prebrojavanja razlika naprezanja poput metode rezervoara ili metode kišnog toka [92]. Metoda rezervoara pogodnija je za ručne proračune dok je metoda kišnog toka pogodna za programiranje, odnosno, računalni proračun [93]. Na taj način je moguće dobiti histogram naprezanja gdje je svaki blok definiran amplitudom naprezanja, $\Delta\sigma_i$ i odgovarajućim brojem promjena toga naprezanja, n_i . Na slici 2.23 je prikazan histogram sa šest ovakvih blokova. Pretpostavlja se da svaki blok naprezanja uzrokuje određeno

djelomično oštećenje u omjeru (n_i/N_i). Prilikom toga se zanemaruje redoslijed djelovanja naprezanja.



Slika 2.23. Palmgren-Miner-ova hipoteza linearne akumulacije oštećenja

Ovaj postupak naziva se Palmgren-Miner-ova hipoteza linearne akumulacije oštećenja, poznatija kao Miner-ovo pravilo [94]. Spomenuta metoda je usvojena i u europskoj normi [90]. Prema Minerovom pravilu, ukupno oštećenje kod umora se može izraziti kao:

$$\sum_{i=1}^{i=j} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.3)$$

gdje su:

n_i broj promjena razlika naprezanja konstantne amplitude $\Delta\sigma_i$,

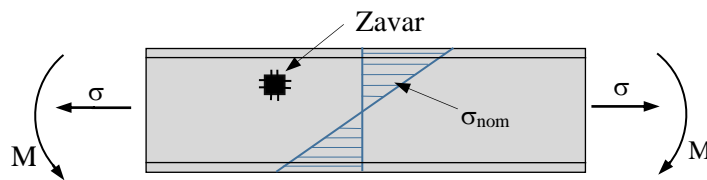
N_i broj promjena naprezanja $\Delta\sigma_i$ do otkazivanja.

Otkazivanje nastupa u slučaju kada je zbroj svih pojedinačnih oštećenja jednak jedinici. Minerovo pravilo se također može primijeniti koristeći koncept ekvivalentne razlike naprezanja. Ono predstavlja zamišljenu razliku naprezanja konstantne amplitude $\Delta\sigma_e$ koja, ukoliko nastupi dovoljan broj puta, uzrokuje isto oštećenje kao i Miner-ov zbroj svih razlika naprezanja iz histograma. Ekvivalentna razlika naprezanja se uspoređuje s pripadajućom S-N krivuljom za dani broj promjena naprezanja.

2.7.2.1 Pristup temeljen na nominalnim napreznjima

2.7.2.1.1 Procjena životnoga vijeka kod umora

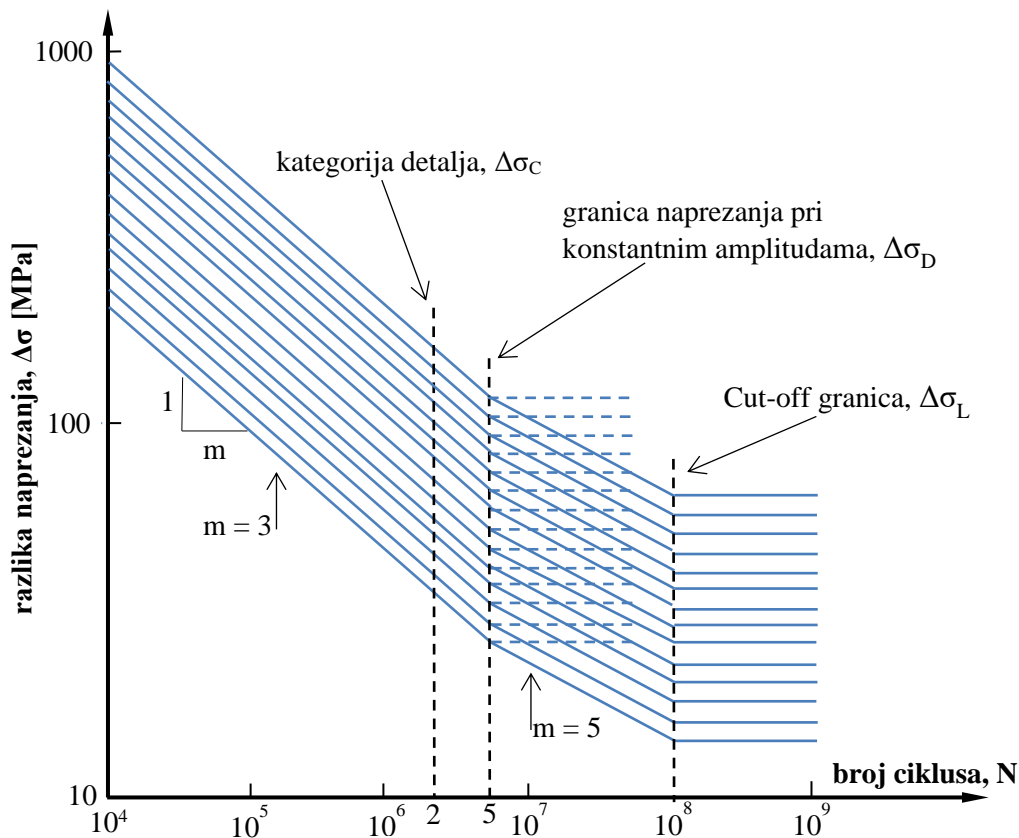
Pristup temeljen na nominalnim napreznjima je najčešće korišten pristup za procjenu životnoga vijeka čeličnih konstrukcija izloženih umoru, a usvojen je i u europskim normama [90]. Ovaj se pristup bazira na prosječnom napreznju u promatranom poprečnom presjeku. Napreznje se proračunava pomoću klasične mehanike konstrukcija pod pretpostavkom linearno-elastične teorije. Pri tome se zanemaruju lokalni utjecaji koji uzrokuju povećanje (koncentraciju) napreznja, ali se uzimaju u obzir geometrijske modifikacije koje imaju značajan utjecaj na promjenu napreznja duž poprečnog presjeka (npr. izrezane rupe). Lokalni utjecaji se indirektno uzimaju u obzir pomoću S-N krivulja. Slika 2.24 prikazuje određivanje nominalnog napreznja zanemarujući koncentraciju napreznja u okolini zavara.



Slika 2.24. Nominalno napreznje u komponenti oblika grede

Kategorije detalja i odgovarajuće S-N krivulje bazirane na nominalnim napreznjima dostupne su u većini smjernica za dimenzioniranje. Budući da kategorija detalja ovisi o geometriji elementa, opterećenju i lokaciji pukotine, promatrani zavareni detalj mora biti sličan detalju danom u smjernicama. Pristup temeljen na nominalnim napreznjima nije prikladan za geometrijski složene detalje kojima se ne može pridružiti odgovarajuća S-N krivulja, ili ukoliko je opterećenje takvo da nije moguće izračunati nominalno napreznje. U tom se slučaju koriste pristupi koje uzimaju u obzir lokalne utjecaje (lokalni pristupi).

Otpornost AW detalja kod umora je u EN 1993-1-9 [90] za normalne nominalne razlike napreznja definirana skupom od 14 jednako raspoređenih krivulja prikazanih u dvostrukom logaritamskom mjerilu kao što je prikazano na slici 2.25. Svaka od tih krivulja predstavlja jednu kategoriju detalja, a konvencionalno je definirana s otpornosti pri $N = 2 \cdot 10^6$ broja ciklusa i konstantnim nagibom $m = 3$ ili 5 (nagib = $-1/m$).



Slika 2.25. S-N krivulje za normalne razlike naprezanja [90]

S-N krivulje koje predlaže norma EN 1993-1-9 [90] za AW detalje imaju nagib $m = 3$ sve do naprezanja koje se naziva granica umora pri konstantnim amplitudama, gdje nagib prelazi u $m = 5$. Ova točka odgovara razlikama naprezanja pri $5 \cdot 10^6$ broja promjena naprezanja. Ukoliko bi se uzorak opteretio cikličnim naprezanjima s promjenjivim amplitudama, tada vrijedi sljedeće:

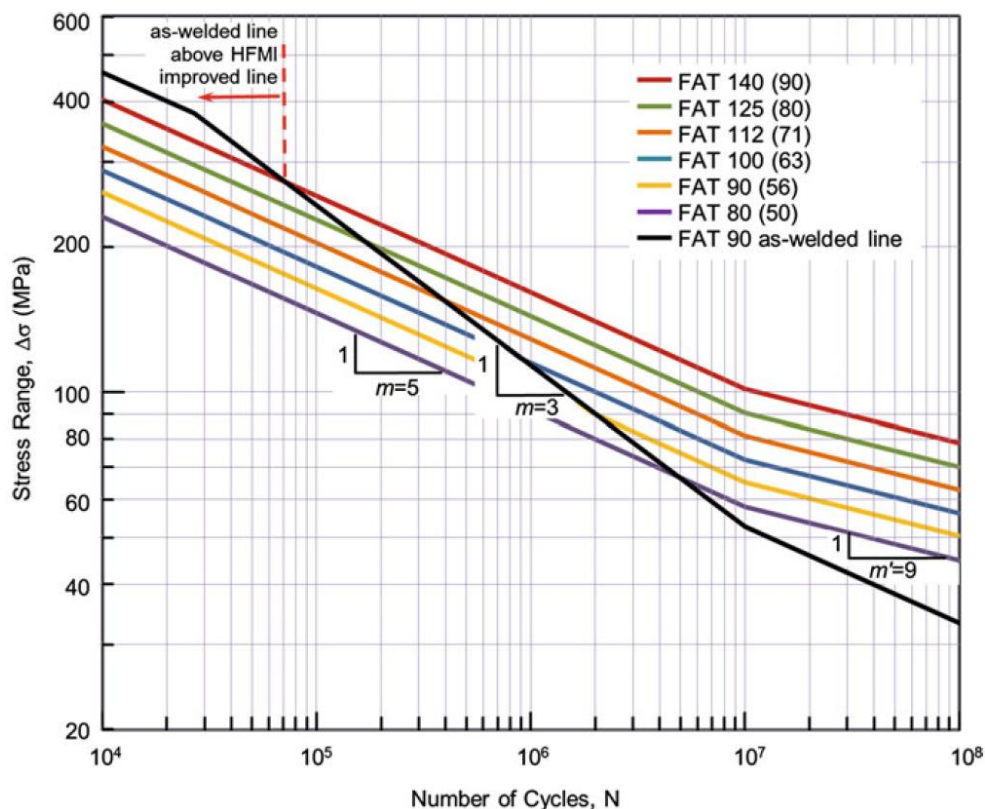
- Ukoliko niti jedna razlika naprezanja ne prelazi ovu granicu, ne treba se razmatrati oštećenje umorom
- Ukoliko barem jedna razlika naprezanja prelazi ovu granicu, primjenjuje se Minerovo pravilo linearne akumulacije oštećenja

U drugom slučaju se razmatraju dvije opcije, kada su pojedine razlike naprezanja ispod granice konstantnih amplituda, kako slijedi:

- Provesti jednostavan proračun oštećenja pretpostavljajući nastavak S-N krivulje iza granice konstantnih amplituda s konstantnim nagibom od $m = 3$.
- Provesti proračun oštećenja, pretpostavljajući da iza granice konstantnih amplituda se nastavlja pravac u nagibu $m = 5$.

U oba slučaja, presjek S-N linije s vertikalnom linijom od 10^8 ciklusa se smatra „cut-off“ granicom. Sva naprezanja ispod ove granice se mogu zanemariti u doprinosu oštećenja umorom.

U slučaju HFMI obrađenih zavarenih detalja, S-N krivulje su bazirane na pretpostavljenom nagibu $m = 5$, a kategorija detalja kod umora je također definirana za $N = 2 \cdot 10^6$ broja promjena naprezanja [15]. Procjena životnoga vijeka HFMI tretiranih detalja prema IIW smjernicama [15] obuhvaća detalje u razredima od FAT50 do FAT90. Ovo ograničenje je zbog činjenice da se više klase odnose na nezavarene detalje ili detalje s već obrađenim zavarima [95]. Detalji razreda nižeg od FAT50 nisu razmatrani, budući da kod ovakvih detalja postoji i veliki rizik od otkazivanja preko korijena zavara, gdje HFMI nema utjecaja. S-N krivulje za HFMI obrađene detalje čelika niže kvalitete ($f_y < 355$ MPa) i $R \leq 0,15$. Vrijednost u zagradi predstavlja kategoriju detalja FAT za AW detalje prema Hobbacher-u su prikazane na slici 2.26.



Slika 2.26. Karakteristične nominalne S-N krivulje za HFMI obrađene zavarene [15,96]

Maksimalna kategorija detalja koja se potencijalno može postići obradom zavara je po iznosu najbliža kategoriji koja se dobije kada bi se vrijednost kategorije AW detalja pomnožila s faktorom 1,6. Kako bi se olakšao proračun, ovo odgovara poboljšanju od četiri kategorije

detalja. Na primjer, ukoliko se detalj kategorije FAT71 obradi HFMI metodom, njegova nova vrijednost iznosi FAT112. Na slici 2.26 ovakva S-N krivulja je označena kao 112 (71). Ukoliko se na slici 2.26 promatra detalj razreda FAT90, vidi se da se krivulja AW zavara s nagibom $m = 3$ te krivulja zavara obrađenoga HFMI obradom sijeku u točki oko $N = 72\ 000$ ciklusa. To znači da za zavarene konstrukcije od čelika niže kvalitete neće nastupiti značajnije poboljšanje otpornosti na umor HFMI obradom za životni vijek manji od 72 000 ciklusa.

2.7.2.1.2 Utjecaj debljine ploče

Još od 1950-ih je poznato da otpornost na umor ovisi o debljini elementa te da se smanjuje povećanjem njihove debljine [97]. Kod debljih ploča, veći volumen materijala je izložen visokim naprezanjima te je otpornost na umor ovakvih detalja manja. Uz to, povećanje debljine ploče (uz zadržavanje lokalne geometrije ruba zavara) također stvara i veće koncentracije naprezanja na rubu zavara zbog manjeg omjera radijusa zareza i debljine ploče [98,99]. Više o utjecaju debljine elemenata na otpornost kod umora se može pronaći u [98]. Činjenica je i da su zaostala naprezanja kao posljedica zavarivanja veća kod debljih elemenata. Iako je utjecaj debljine elementa na životni vijek kod umora zavarenih detalja poznat i pokriven različitim normama, ovaj utjecaj nije sistematično istražen za obrađene zavare HFMI postupcima [97]. Smjernice za procjene umora detalja HFMI obrađenih se primjenjuju za debljine ploča od 5 – 50 mm [15]. Debljina ploča i zavara utječu na lokalnu koncentraciju naprezanja na rubu zavara te gradijente naprezanja kroz debljinu ploče. Zbog toga procjene preko nominalnih i Hot spot naprezanja, o kojima će biti riječi kasnije u ovom radu, zahtijevaju primjenu faktora redukcije za sve ploče deblje od 25 mm [96].

2.7.2.1.3 Utjecaj kvalitete čelika

Kako je ranije spomenuto, otpornost AW zavarenih detalja kod umora ne ovisi o kvaliteti materijala elemenata koji se spajaju. Međutim, postoje brojne studije koje pokazuju da se stupanj poboljšanja HFMI obrađenih povećava s čvrstoćom materijala [10,38]. U radu [100] je potvrđeno da HFMI obrada uz unošenje povoljnih tlačnih naprezanja do dubine od 1 mm i unošenjem radijusa ruba zavara od 2 mm ima najveći učinak kod čelika visoke čvrstoće. U radu [101] je pokazano da ukoliko se uzme granica popuštanja $f_y = 355$ MPa kao referentna, za svako povećanje čvrstoće čelika od 200 MPa povećanje u otpornosti na umor iznosi otprilike 12,5%. Ovo se može objasniti na način da su tlačna zaostala naprezanja unesena obradom proporcionalna granici popuštanja [16].

U smjernicama se za svako povećanje granice popuštanja od 200 MPa predlaže povećanje od jednog FAT razreda. Preporuke za dimenzioniranje uključuju povećanje od četiri FAT razreda za detalje od čelika $f_y < 355$ MPa obzirom na krivulje za nominalna naprezanja kod AW stanja. Povećanje za dodatni razred se provodi za svako povećanje granice popuštanja čelika od 200 MPa. Specifično povećanje razreda se definira za $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusa i pretpostavljeni S-N nagib od $m = 5$ za HFMI obrađene detalje i $m = 3$ za AW stanje. Dopušteno povećanje u broju FAT razreda kao funkciju granice popuštanja može se pronaći u [15]. Zavareni detalj od čelika visoke čvrstoće kao npr. FAT 80 ($m=3$) u AW stanju bi bio FAT180 ($m=5$) ukoliko je HFMI obrađen. FAT 90 bi kao obrađen imao isti razred od FAT 180. Ovo ograničenje je zbog trenutnog nedostatka eksperimentalnih podataka te najviša kategorija u koju se detalj može poboljšati iznosi FAT180.

2.7.2.1.4 Utjecaj opterećenja i omjera naprezanja

Za procjenu umora obrađenih zavarenih detalja, ograničenje omjera naprezanja u smjernicama iznosi $R \leq 0,5$, a maksimalno naprezanje $\sigma_{\max} \leq 0,8 f_y$ [35]. Ova ograničenja se primjenjuju zbog mogućih nestabilnosti zaostalih naprezanja ukoliko bi se premašile dopuštene vrijednosti ograničenja. U literaturi postoje ispitivanja obrađenih zavarenih detalja na umor s promjenjivim amplitudama i nominalnim preopterećenjima od $0,9 f_y$, $1,0 f_y$ i $1,1 f_y$ gdje je potvrđeno da se učinak HFMI obrade smanjuje povećanjem opterećenja [45]. HFMI obrađeni detalji mogu imati do 8 FAT razreda poboljšanja ovisno o čvrstoći materijala, geometriji zavarenoga detalja itd. Utjecaj omjera naprezanja se izražava kao ograničenje u maksimalno dozvoljenom povećanju broja FAT razreda. Ograničenje maksimalne konstantne amplitude naprezanja $\Delta\sigma$ koja se može primijeniti na zavar kako bi se osigurao pozitivan učinak HFMI obrade [15].

2.7.2.1.5 Naprezanja s promjenjivim amplitudama

S-N krivulje se baziraju na podacima ispitivanja dobivenim uglavnom pri konstantnim amplitudama, dok su u stvarnosti detalji izloženi naprezanjima s promjenjivim amplitudama. U takvim se situacijama zapis naprezanja pretvara u zapis s konstantnim amplitudama na temelju metoda prebrojavanja razlika naprezanja poput metode kišnog toka ili metode rezervoara [92]. Na taj način se dobiva niz razlika naprezanja konstantnih amplituda s pripadajućim brojem ponavljanja. Ukupni životni vijek se tada računa pomoću Palmgren-Minerovog pravila pravilo [94]. Osnovni parametri koji utječu na ponašanje HFMI tretirane konstrukcije kod umora jesu periodičnost pojavljivanja preopterećenja, raspored ciklusa opterećenja u spektru opterećenja

te maksimalne i minimalne razine naprezanja. Za određivanje životnoga vijeka detalja koristi se ekvivalentna razlika naprezanja dana sljedećom izrazom.

$$\Delta\sigma_{\text{eq}} = \left(\frac{1}{D} \cdot \frac{\sum \Delta\sigma_i^m N_i + \sigma_k^{(m-m')} \sum \Delta\sigma_j^{m'} N_j}{\sum N_i + \sum N_j} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.4)$$

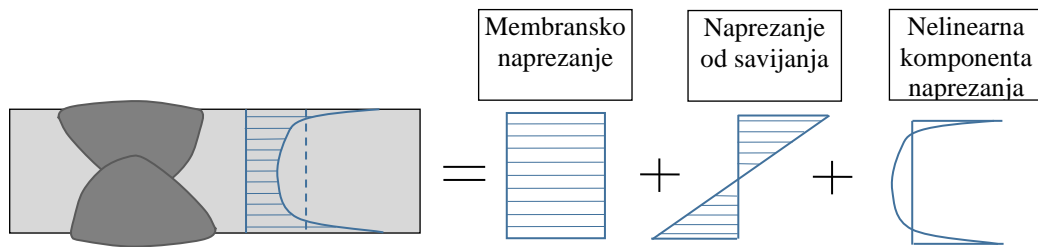
u izrazu (2) $\Delta\sigma_k$ je razlika naprezanja povezana s granicom proračunatom na $N = 1 \cdot 10^7$, N_i je broj ciklusa naprezanja $\Delta\sigma_i$ gdje je $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_k$, N_j je broj ciklusa naprezanja $\Delta\sigma_j$ gdje je $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_k$, m je nagib S-N krivulje iznad točke promjene nagiba, $m' = 2m-1$ je nagib krivulje ispod točke promjene nagiba i D je suma oštećenja, odnosno $D = 0,5$.

Kako je ranije spomenuto, značajan udio u poboljšanju životnoga vijeka HFMI obrađenih detalja se odnosi na povoljna tlačna naprezanja. Stoga se svaka promjena u zaostalim naprezanjima tijekom opterećivanja detalja promjenjivim amplitudama može imati značajan utjecaj na čvrstoću kod umora. Za HFMI obrađene detalje od čelika visoke čvrstoće su zabilježene promjene načina otkazivanja ovisno o tome je li opterećenje umorom konstantnih ili promjenjivih amplituda [52]. Promjenjive amplitude koriste zapis naprezanja koji sadrži pojedine cikluse s velikim skokovima u naprezanjima što dovodi do nastanka pukotine. U radu [102] su uspoređivani rezultati ispitivanja s konstantnim amplitudama ($R = 0,5$ do $0,7$) te ograničenim promjenjivim amplitudama s predloženim IIW smjericama [35]. Potvrđeno je da nagibi S-N krivulja variraju u rasponu od $4,4$ do $9,6$. Zaključeno je da je blaži nagib prikladniji za dimenzioniranje HFMI obrađenih zavara izloženih umoru za srednji i visoko ciklični umor (10^4 do 10^7 ciklusa).

2.7.2.2 S-N pristup temeljen na Hot spot naprezanjima

Procjena umora zavarenih detalja preko Hot spot naprezanja se u početku koristila za zavarene detalje cijevnih elemenata [103]. Kasnije se počela koristiti za pločaste elemente i u konačnici postala normirani postupak za procjenu životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru [27]. Hot spot je kritična točka na rubu zavara gdje se očekuje nastanak pukotine zbog umora.

Kako je ranije spomenuto, čvrstoća zavarenog detalja izloženog umoru ovisi o nesavršenostima unutar zavara i lokalnim koncentracijama naprezanja zbog utjecaja geometrije detalja ili utjecaja zareza u zavaru. Ukupno naprezanje u Hot spot-u sastoji se od komponenta membranskog naprezanja, naprezanja od savijanja ploče i nelinearne komponente naprezanja zbog efekta zareza na rubu zavara, slika 2.27.



Slika 2.27. Ukupno stvarno naprezanje u Hot spot-u

Osnovna ideja pristupa preko Hot spot naprezanja je isključivanje nelinearne komponente iz proračuna naprezanja, obzirom da nije moguće unaprijed poznavati stvarnu geometriju zavara. Utjecaj zarez se implicitno uzima u obzir pomoću odgovarajuće S-N krivulje. U ovom pristupu, S-N krivulje moraju pokriti samo one utjecaje koji se odnose na lokalnu koncentraciju naprezanja unutar zavara (efekt zarez) i lokalne defekte zavara. Zbog toga je potreban manji broj S-N krivulja nego u slučaju pristupa preko nominalnih naprezanja. Pristup preko Hot spot naprezanja uglavnom se koristi kada zbog složene geometrije nije moguće jasno definirati nominalno naprezanje i u slučajevima kada promatrani detalj nije moguće svrstati u neku od ponuđenih kategorija detalja danih u normama.

U situacijama kada se može jednostavno izračunati nominalno naprezanje koristi se faktor koncentracije naprezanja K_s kojim se uvećava nominalno naprezanje i određuje Hot spot naprezanje. Ovi faktori su dani samo za ograničen broj detalja, a mogu se pronaći u [104]. Hot spot naprezanje je tada određeno kao:

$$\sigma_{hs} = K_s \cdot \sigma_{nom} \quad (2.5)$$

gdje je σ_{nom} nominalno naprezanje u području Hot spot-a. Primjer korištenja faktora koncentracije naprezanja u proračunu Hot spot naprezanja pri procjeni višeosnog umora dan je u [105].

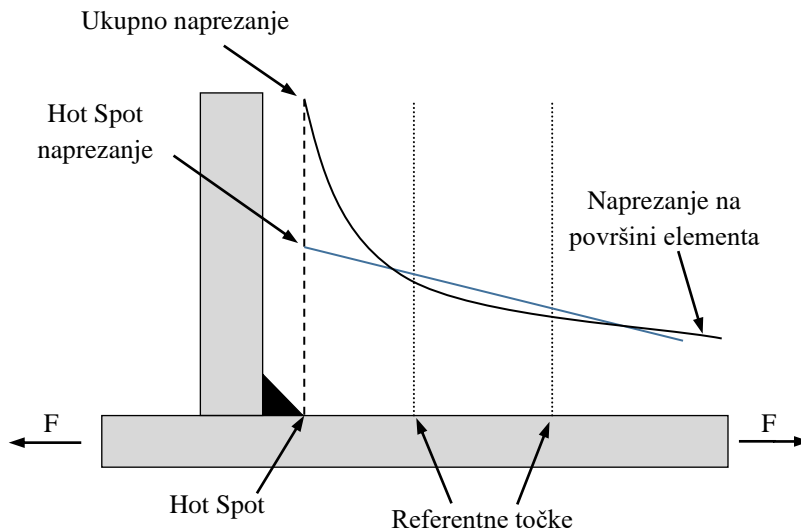
U većini slučajeva nije moguće analitički odrediti Hot spot naprezanje. Tada se koristi modeliranje metodom konačnih elemenata [106]. Na ovaj se način mogu određivati i spomenuti faktori koncentracije naprezanja. Proračun se provodi uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja materijala. Prilikom modeliranja potrebno je koristiti konačne elemente koji su u mogućnosti modelirati savijanje ploče. Vrijednosti naprezanja ovise o veličini i tipovima konačnih elemenata, a posebnu pažnju je potrebno obratiti na modeliranje ruba zavara i odabir položaja Hot spot-a. Potrebno je široko znanje i iskustvo kako bi se izbjegle pogreške u modeliranju i interpretiranju rezultata proračuna. Smjernice za modeliranje dane su u [107].

Prilikom proračuna metodom konačnih elemenata, dobiveni rezultati često odstupaju od stvarnog stanja. Razlog tome je idealizacija geometrije čime se zanemaruju geometrijska odstupanja nastala procesom proizvodnje. Ona uzrokuju sekundarne momente savijanja u pločama opterećenim membranskim naprezanjima. Geometrijska odstupanja se trebaju uzeti na način da se metodom konačnih elemenata proračuna model s idealiziranom geometrijom, a zatim se tako dobiveno nominalno naprezanje modificira faktorom K_m koji uzima u obzir geometrijska odstupanja. Ovaj je faktor dan preko parametarskih formula, a može se pronaći u [107]. Tako se dobije modificirano nominalno naprezanje:

$$\sigma_{nom} = K_m \cdot \sigma_{nom,m} + \sigma_{nom,b} \quad (2.6)$$

gdje je $\sigma_{nom,m}$ membranska komponenta naprezanja, a $\sigma_{nom,b}$ komponenta naprezanja od savijanja.

Hot spot naprezanja se mogu dobiti i mjerenjem na postojećim konstrukcijama [108]. Mjere se deformacije u referentnim točkama iz kojih se tada provodi ekstrapolacija na Hot spot, slika 2.28. Iz izmjerenih i ekstrapoliranih deformacija se izvode naprezanja. Ekstrapolacija se provodi kako bi se isključila nelinearna komponenta naprezanja, a ekstrapolira se iz područja gdje je raspodjela naprezanja još uvijek linearna. Ovo područje za pločaste elemente počinje otprilike na udaljenosti $0,4t$ od ruba zavora, gdje je t debljina ploče. Preporuke za određivanje referentnih točaka i ekstrapolaciju se mogu pronaći u [96].



Slika 2.28. Definicija Hot spot naprezanja [96]

Kada se u referentnim točkama izmjere deformacije, dovoljno je korištenjem linearne ekstrapolacije odrediti Hot Spot naprezanje. Prema preporukama IIW-a [96], linearna ekstrapolacija se provodi iz vrijednosti naprezanja u dvije referentne točke na određenim udaljenostima od ruba zavora koje su u funkciji debljine ploče. U slučajevima kada je opterećeni pločasti element oslonjen na kruti elastični oslonac (poput pojasnice iznad hrpta), linearnom ekstrapolacijom se može podcijeniti Hot spot naprezanje. U tom slučaju je potrebno koristiti nelinearnu ekstrapolaciju iz tri referentne točke. Fricke [109] je u svom radu ispitivao tri različite tehnike ekstrapolacije. Promatrano naprezanje uspoređivao je sa S-N krivuljama predloženim u IIW smjernicama [96]. Zaključio je da se predložene metode ekstrapolacije mogu koristiti sa S-N krivuljama danim u spomenutim normama. Xiao i Yamada [110] predložili su koncept koji se temelji na proračunu vrijednosti naprezanja na dubini od 1 mm ispod površine na rubu zavora, u smjeru očekivanog širenja pukotine. Pokazalo se da se ovaj način proračuna slaže s proračunom pomoću ekstrapolacije naprezanja.

Postupak procjene umora pomoću Hot spot metode slijedi istu proceduru kao i postupak preko nominalnih naprezanja. Hot spot naprezanje se uspoređuje s pripadajućom S-N krivuljom određenog detalja. S-N krivulje za Hot spot naprezanje mogu se pronaći u [90,96]. Potrebno je napomenuti da se ovaj postupak procjene provodi uz pretpostavku da pukotina kod umora nastaje na rubu zavora. Kao i u slučaju nominalnih naprezanja, karakteristične krivulje HFMI obrađenih zavarenih detalja su definirane za $N = 2 \cdot 10^6$, a bazirane su na pretpostavljenom nagibu od $m = 5$ u području $10^4 \leq N < 10^7$ i $m' = 9$ za $10^7 \leq N$. U kontekstu pristupa preko nominalnih naprezanja kod procjene umora HFMI tretiranih detalja, ranije je spomenuto da

najviše dopuštena S-N krivulja odgovara razredu FAT180. Problem koji se javlja kod Hot Spot proračuna je kod zavarenih detalja s relativno malim koncentracijama naprezanja gdje se može postići veoma visoka kategorija detalja, a u smjernicama se ona ograničava na FAT180.

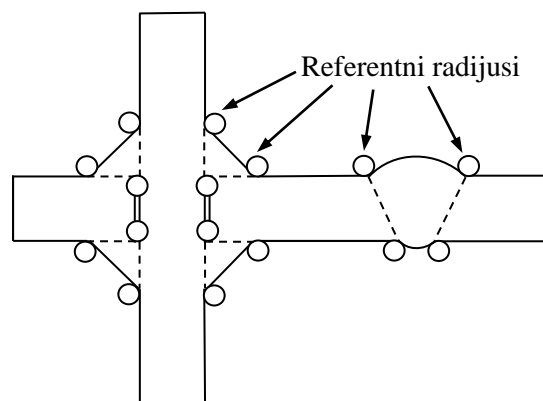
Koncentracija naprezanja u „Hot spot“ metodi se definira kao omjer geometrijskog σ_s i nominalnog naprezanja σ_{nom} prema sljedećem izrazu:

$$K_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{nom}} \quad (2.7)$$

Kao i kod nominalnih naprezanja, potrebno je koristiti faktor redukcije razreda čvrstoće kod umora zbog debljine te je potrebno koristiti smjernice za promjenjive amplitude zajedno s Hot spot pristupom. Primjeri proračuna životnoga vijeka kod umora obrađenih zavarenih detalja pomoću „hot spot“ pristupa mogu se pronaći u [111,112].

2.7.2.3 S-N pristup temeljen na efektivnom naprezanju u zarezu

S-N pristup temeljen na efektivnom naprezanju u zarezu (engl. *Notch stress*) je pristup koji je danas sve više zastupljen u industriji, a smjernice za procjenu umora ovim pristupom mogu se pronaći i u normama [113,114]. Osnovni koncept navedenog pristupa je numeričko modeliranje korijena ili ruba zavara sa zarezima određenog referentnog radijusa, slika 2.29. Efektivno naprezanje u zrezu je ukupno naprezanje u dobiveno proračunom pod pretpostavkom linearno elastičnog ponašanja materijala.[27]



Slika 2.29. Referentni radijusi za proračun Efektivnog naprezanja u zrezu [27]

U procjenama umora pristupom temeljenim na Efektivnom naprezanju u zrezu postoje dva najčešće korištena zamišljena radijusa u iznosu od 1 mm i 0,05 mm. Svaki zarez u korijenu ili rubu zavara modelira se bez diskontinuiteta uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja materijala. Referentni radijus od 1 mm koristi se za ploče deblje od 5 mm pa ova metoda nalazi

primjenu i u građevinskoj struci. Procjena umora bazirana na Efektivnom naprežanju u zarezu slijedi isti postupak kao i pristup preko nominalnih naprežanja, s tim da se umjesto globalnog naprežanja razmatra lokalno naprežanje u zrezu. Procedura procjene bazira se na usporedbi Efektivne amplitude naprežanja kod umora s odgovarajućom S-N krivuljom koja predstavlja otpornost. Ovakve se krivulje predlažu u preporukama IIW-a [115] za pločaste konstrukcije opterećene uzdužnim silama i momentima savijanja.

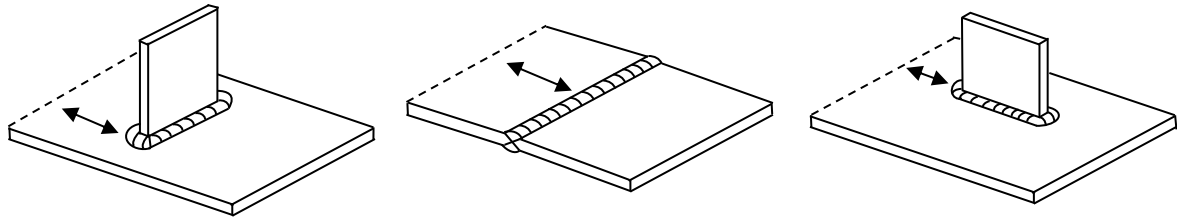
U 2008. godini, IIW je odobrio smjernice za procjenu umora tretiranih detalja pomoću Efektivnog naprežanja u zrezu [116]. Prijedlog proračuna se temelji na analizi naprežanja koristeći zamišljeni radijus zreza $\rho_f = 1$ mm te na proceduri koju je opisao Fricke [115]. Nagib S-N krivulja HFMI obrađenih zavarenih detalja je isti kao i kod Hot Spot naprežanja. Kao i kod metode nominalnih naprežanja, karakteristične krivulje su definirane za $N = 2 \cdot 10^6$. Za HFMI obrađene zavare, odgovarajuće S-N krivulje su dane u [15], za različite klase čelika. Također, primjenjuje se ograničenje gdje poboljšana kategorija detalja može biti maksimalno FAT 180. Fricke [115] definira efektivnu „Notch“ koncentraciju naprežanja kao omjer Efektivnog naprežanja u zrezu σ_w i geometrijskog naprežanja σ_s prema sljedećem izrazu:

$$K_w = \frac{\sigma_w}{\sigma_s} \quad (2.8)$$

Fricke također predlaže da minimalni K_w bude najmanje 1,6 za detalje s malom koncentracijom naprežanja, čak i ukoliko se proračunom dobije manji faktor. Dodatni zahtjevi za HFMI detalje nisu potrebni jer je K_w definiran s obzirom na geometrijsko naprežanje σ_s , gdje se već primjenjuju određena ograničenja i zahtjevi. Preporuke čvrstoće kod umora dane u [15] se temelje na pretpostavci da je $\Delta\sigma$ proračunata u smislu maksimalnog glavnog naprežanja u zrezu. Kao kod nominalnih naprežanja, potrebna je redukcija FAT klase s obzirom na omjer naprežanja te prema smjernicama za promjenjive amplitude. Budući da je ova metoda izrazito lokalnog karaktera, nije potrebna redukcija zbog debljine elementa.

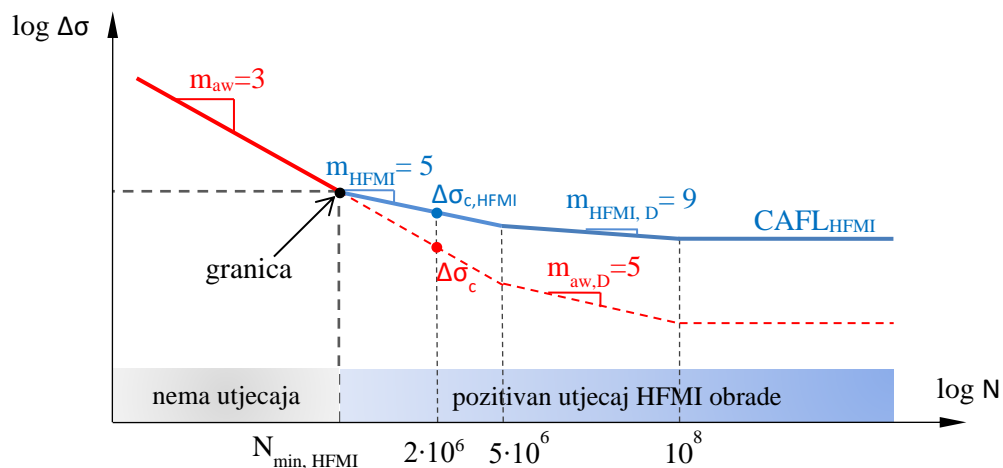
2.7.3 Dimenzioniranje prema novoj generaciji EN 1993-1-9

Zavareni detalji obrađeni HFMI metodom na koje se odnosi Dodatak F nove generacije EN 1993-1-9 [117] su prikazani na slici 2.30. U AW stanju prikazani detalji otkazuju preko ruba zavora. Iz tog razloga, obrada ruba zavora HFMI metodom rezultira poboljšanjem otpornosti na umor promatranih zavarenih detalja. S-N krivulje HFMI obrađenih detalja se odnose na ploče debljine $t \geq 5$ mm.



Slika 2.30. Konstrukcijski detalji obuhvaćeni u Dodatku F nove generacije EN 1993-1-9 [117]

Karakteristična S-N krivulja otpornosti HFMI obrađenoga zavarenoga detalja je dana na slici 2.31. Do granice od $N < 5 \cdot 10^6$, krivulja poboljšane otpornosti ima nagib $m_{\text{HFMI}} = 5$. Za granicu broja ciklusa od $5 \cdot 10^6 < N \leq 10^8$, krivulja poboljšane otpornosti na umor ima nagib $m_{\text{HFMI,D}} = 9$.



Slika 2.31. Karakteristična S-N krivulja otpornosti HFMI obrađenoga zavarenoga detalja [117]

Za razliku naprezanja $\Delta \sigma_s$, krivulja otpornosti AW stanja (crvena linija) i HFMI obrađenoga stanja (zeleno linija) se sijeku u točki koja odgovara broju promjena ciklusa $N_{\text{min,HFMI}}$. Ona označava minimalan broj ciklusa za koji HFMI tretman poboljšava otpornost zavarenog detalja

izloženog umoru (*engl. threshold beneficial effect*). Krivulja otpornosti za HFMI obrađene detalje vrijedi samo za slučaj kada je $N > N_{\min, HFMI}$. Ispod ove vrijednosti je potrebno koristiti krivulju otpornosti za AW stanje. Vrijednosti $N_{\min, HFMI}$ i $\Delta\sigma_s$ za promatrane detalje, kao i kategorije obrađenih detalja, $\Delta\sigma_{C, HFMI}$, bit će definirane Dodatkom F nove generacije EN 1993-1-9 [117].

2.7.4 Metode proračuna perioda nastanka i širenja pukotine kod umora

2.7.4.1 Uvod

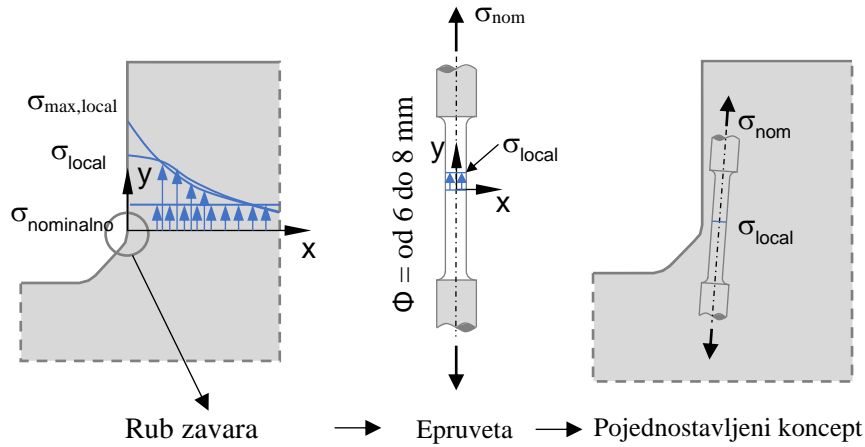
Kako je ranije rečeno, životni vijek konstrukcijskog detalja izloženog umoru se sastoji od perioda nastanka i perioda širenja pukotine. S-N metoda promatra ukupni životni vijek detalja, N_F te ne daje eksplicitno podatke o završetku faze nastanka, N_i i početku faze širenja pukotine, N_F . Dok nezavareni detalji pokazuju značajnije dulje periode nastanka pukotine, kod zavarenih detalja dominantan utjecaj ima period širenja pukotine, iako i tu period nastanka pukotine ima svoj udio. HFMI metoda kod obrađenih zavarenih detalja značajno produljuje period nastanka pukotine, stoga bi model procjene životnoga vijeka kod umora HFMI obrađenih detalja trebao razmatrati ova dva perioda odvojeno.

U literature postoji više metoda kojima se opisuje nastanak pukotine poput “*fatigue notch factor*” [118–120], “*notch strain approaches*” [27,121,122] ili “*notch stress intensity factor*” [123,124]. U okviru ovog istraživanja se razmatra pristup preko Deformacije u zarezu (*engl. Notch strain approach, NS*), kojim se proračunava period nastanka pukotine, gdje se definira broj promjena naprezanja određene amplitude do nastanka pukotine određene dubine. Metoda se koristi u strojarstvu, gdje postoji i mnogo smjernica, ali je njezina primjena u građevinarstvu i dalje rijetka [125]. Širenje pukotine se modelira linearnom elastičnom mehanikom loma (*engl. Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM*) [27,126,127], koja daje broj promjena ciklusa naprezanja određene amplitude za širenje pukotine do kritične dubine kada nastupa otkazivanje. Mehanika loma se općenito koristi za postojeće konstrukcije te njezin puni potencijal za procjenu umora novih zavarenih detalja još uvijek nije dovoljno istražen [126].

2.7.4.2 Model za proračun nastanka pukotine – NS pristup

Pristup preko deformacije u zarezu (*engl. Notch strain approach*), u daljnjem tekstu NS pristup, predložili su Seeger i suradnici [121]. Procjena otpornosti se sastoji od određivanja naprezanja i deformacija na rubu zavara u elastoplastičnim uvjetima te pomoću krivulje deformacije

materijala uzorka ($\Phi = 6 - 8 \text{ mm}$) određivanje broja promjena toga naprezanja do njegovog potpunog otkazivanja (slika 2.32). Uvod u NS pristup se može pronaći u [27,128].



Slika 2.32. Koncept sličnosti za NS pristup [129]

Naprezanja i deformacije na rubu zavora unutar zavarenog detalja se proračunavaju iz krivulje naprezanje-deformacija te Neuberovim izrazom iz [130]. Za konzervativniji proračun se uzima faktor koncentracije naprezanja K_t na promatranom mjestu [131]. Naprezanja i deformacije u zarezu zavora u elasto-plastičnom stanju prema Neuber-u su dane kao:

$$\sigma_k \varepsilon_k = \sigma_n \varepsilon_n K_t^2 = \frac{(\sigma_n K_t)^2}{E} \quad (2.9)$$

$$K_{t\sigma} K_{t\varepsilon} = K_t^2 \quad (2.10)$$

gdje je K_t elastični faktor koncentracije naprezanja, $K_{t\sigma}$ elasto-plastični faktor koncentracije naprezanja, $K_{t\varepsilon}$ elasto-plastični faktor koncentracije deformacija, σ_k maksimalno napreznje u zarezu, ε_k maksimalna deformacija u zarezu, σ_n nominalno napreznje, ε_n nominalna deformacija ($\varepsilon_n = \sigma_n/E$). Proračun naprezanja i deformacija u zarezu se bazira na stabiliziranoj cikličnoj krivulji napreznje-deformacija. Lokalna napreznja i deformacije slijede cikličku krivulju napreznje-deformacija koja se aproksimira Ramberg-Osgood-ovim izrazom [132]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} \quad (2.11)$$

gdje je ε_a ukupna amplituda deformacija, $\varepsilon_{a,el}$ elastična amplituda deformacija, $\varepsilon_{a,pl}$ plastična amplituda deformacija, σ_a amplituda naprezanja, E modul elastičnosti, K' ciklički koeficijent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija, n' ciklički eksponent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija.

Ciklička krivulja naprezanje-deformacija tvori histereznu petlju u dijagramu naprezanje-deformacija. Dijelovi krivulje su aproksimirani udvostručujući trenutne amplitude primarnih cikličkih krivulja naprezanje-deformacija. Grane krivulje histerezne petlje, koje se podižu ili spuštaju iz točaka uključuju Bauschingerov efekt [133] te su opisane dvostrukom krivuljom naprezanje deformacija [134] kao:

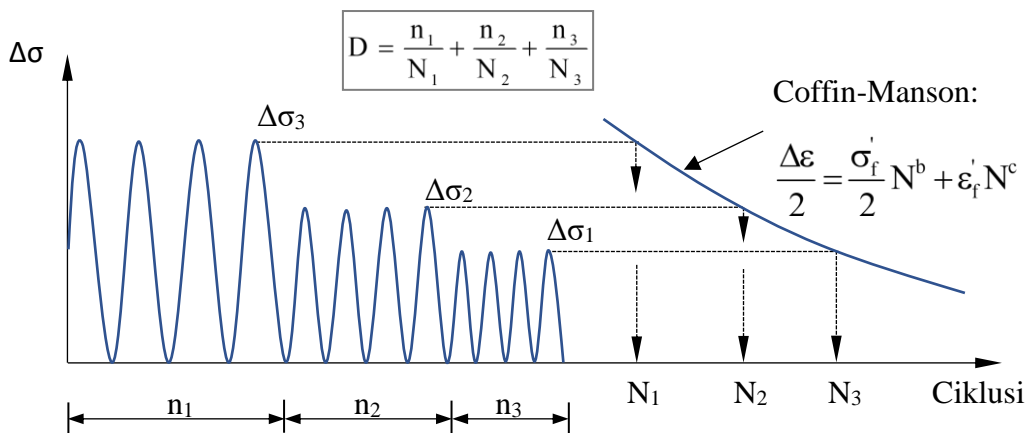
$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (2.12)$$

Otkazivanje, odnosno nastanak pukotine je opisan sa S-N krivuljom deformacija, koja obuhvaća njihov elastični i plastični dio. Krivulja prema Manson-u i Coffin-u, zajedno s korekcijskim učinkom srednjeg naprezanja prema Morrow-u [135–137] glasi:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (2.13)$$

gdje je σ_f' koeficijent čvrstoće na umor, ε_f' koeficijent duktilnosti umora, b eksponent čvrstoće kod umora, c eksponent duktilnosti kod umora, σ_m srednje naprezanje, 2N broj ciklusa do nastanka pukotine.

Procjena životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih naprezanjima s promjenjivim amplitudama se provodi pomoću *Rainflow* metode [92], gdje se iz spektra naprezanja određuju nominalne razlike naprezanja $\Delta\sigma_{nom,1}$, $\Delta\sigma_{nom,2}$, $\Delta\sigma_{nom,i}$ itd. Nakon toga se iz navedenih sustava jednadžbi određuju lokalne razlike naprezanja $\Delta\sigma_{local,1}$, $\Delta\sigma_{local,2}$, $\Delta\sigma_{local,3}$ itd. Životni vijek do nastanka pukotine se procjenjuje ranije spomenutim Minerovim pravilom tako da se za svaku pojedinu amplitudu naprezanja promatra njezin doprinos ukupnom oštećenju, slika 2.33.



Slika 2.33. Ukupna oštećenja za period nastanka pukotine [129]

Doprinos oštećenja kod Minerove hipoteze akumulacije oštećenja od svih zatvorenih histereznih petlji pojedinačnih razlika napreznja (određuju se iz *Rainlow* metode prebrojavanja) se dodaju u ukupno oštećenje. Nastanak pukotine se pojavljuje kada suma svih doprinosa oštećenju dosegne 1,0. Coffin-Mansonova jednadžba se koristi kao ukupni maksimalni broj promjena svake pojedine razlike napreznja do otkazivanja:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad (2.14)$$

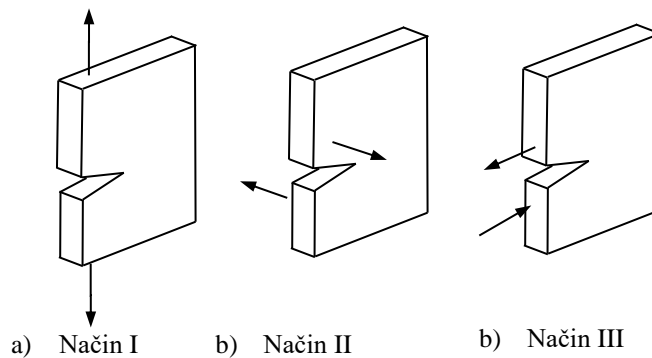
NS pristup ne definira precizno s kojom dubinom pukotine a_i završava period nastanka pukotine. U radu [138] se na temelju autorova iskustva preporuča $a_i = 0,5 - 0,8$ mm. Autori u knjizi [27] preporučuju dubinu nastale pukotine u iznosu od $a_i \approx 1$ mm. Hou i suradnici [139] preporučuju dubinu pukotine od $a_i = 0,25$ mm.

Primjena NS pristupa zahtijeva definiranje materijalnih parametara kod umora (cikličkih materijalnih parametara) koji se određuju ispitivanjima. U literaturi postoje korelacije između materijalnih parametara kod umora i statičkih karakteristika materijala [140]. Pregled ovih metoda se može pronaći u [140]. U okvirima ovog istraživanja razmatraju se tri metode za određivanje jednoosnih parametara materijala kod umora za AW i HFMI obrađene detalje – „*Uniform Material Law*“ (UML), „*Extended UML*“ (Ext-UML) i „*Hardness method*“ (HM). Ove metode su veoma jednostavne i praktične te pružaju brzu procjenu materijalnih parametara kod umora. U nedostatku skupih cikličkih ispitivanja, ove metode se mogu koristiti za procjenu materijalnih parametara za NS pristup. UML je jedna od najpoznatijih metoda za procjenu cikličkih materijalnih parametara [27,129], koju su predložili Bäumel and Seeger [141]. To je jednostavna metoda budući da se materijalni parametri mogu odrediti na temelju Young-ovog modula elastičnosti i vlačne čvrstoće materijala [140]. Korkmaz [142] predlaže Ext-UML za čelike visoke čvrstoće. HM je jednostavna metoda za procjenu cikličkih materijalnih parametara i zahtijeva samo Young-ov modul elastičnosti i Brinellovu tvrdoću na površini materijala (HB). Ova dva parametra su dostupna i lako mjerljiva nerazornim metodama. HM su predložili Rossle i Fatemi [143], a pruža zadovoljavajuće aproksimacije cikličkih materijalnih parametara.

2.7.4.3 Model za proračun širenja pukotine – mehanika loma

Period širenja pukotine se modelira mehanikom loma. Mehanika loma se temelji na podacima o rastu pukotine iz inicijalnog oštećenja poznate dubine, a_i . Zajedno s NS pristupom tvori primjenjivu metodu za procjenu ukupnog životnoga vijeka zavarenog detalja izloženog umoru.

Pukotine nastale umorom unutar materijala mogu se širiti na tri načina. Način I (slika 2.34.a)) predstavlja širenje pukotine u smjeru okomitom na smjer opterećenja. Načini II i III (slika 2.34.b), 2.34.c)) predstavljaju širenje pukotine pod utjecajem posmičnih naprezanja. U okviru ovog istraživanja se razmatra jednoosni umor, odnosno, širenje pukotine isključivo u uvjetima opterećenja vrha pukotine u načinu I.



Slika 2.34. Načini širenja pukotine kroz element

Stopa rasta pukotine je proporcionalna razlici naprezanja, što je izraženo preko faktora intenziteta razlike naprezanja. Njime se opisuje stanje naprezanja u blizini vrha pukotine uzrokovano vanjskim opterećenjem, a izražava se kao:

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot Y \cdot M_k \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.15)$$

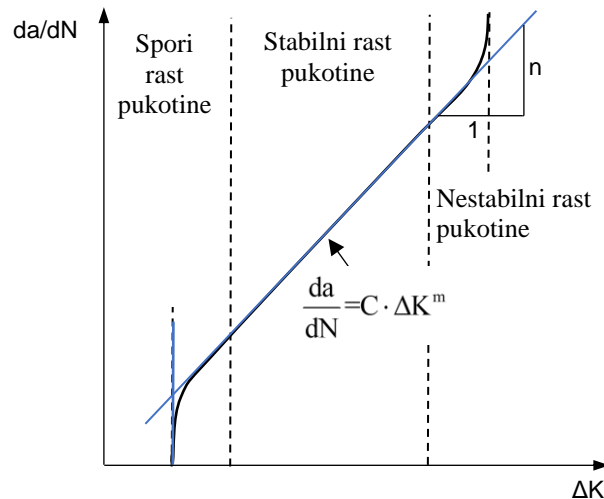
gdje je M_k faktor povećanja zbog koncentracije naprezanja u vrhu pukotine, Y faktor korekcije ovisan o geometriji pukotine, a dubina pukotine te $\Delta\sigma$ razlika naprezanja.

Pukotina se uslijed umora počinje širiti ukoliko faktor intenziteta naprezanja ΔK prelazi kritični faktor intenziteta naprezanja ΔK_{th} , a više o tome u [27]. Granica umora pri konstantnim amplitudama $\Delta\sigma_D$ je direktno povezana uz prag širenja pukotine ΔK_{th} . Na temelju vrijednosti ΔK_{th} , može se proračunati maksimalna razlika naprezanja $\Delta\sigma_D$ ispod koje nema širenja pukotine.

Za procjenu perioda širenja pukotine kod zavarenih detalja izloženih umoru s konstantnim amplitudama koristi se Paris-Erdoganova jednadžba koja aproksimira cikličku stopu rasta pukotina pod ravninskim uvjetima deformacija u vrhu pukotine. Pri tome se pretpostavlja širenje pukotine okomito na smjer djelovanja opterećenja. Paris-Erdoganova jednadžba glasi:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (2.16)$$

gdje je a dubina pukotine, N broj promjena ciklusa opterećenja, C i m eksperimentalno određene konstante materijala, a ΔK – faktor intenziteta naprezanja. Parametri materijala m i C u ovise o mikrostrukturi materijala, srednjem naprezanju, uvjetima okoliša, temperaturi, stupnju korozije itd. Vrijednosti ovih konstanti, kao i popis literature gdje se iste mogu pronaći, prikupljeni su [27,126]. Slika 2.35. prikazuje tipičnu krivulju širenja pukotine prema Paris-Erdoganovom zakonu.



Slika 2.35. Tipična krivulja širenja pukotine [27]

Proces širenja se sastoji od sporog širenja, stabilnog te nestabilnog širenja pukotine nakon čega nastupa otkazivanje. Paris-Erdoganova jednačba se odnosi na područje linearnog stabilnog širenja pukotine. Životni vijek se procjenjuje integracijom Paris-Erdoganove jednačbe:

$$N_{i,j} = \int_{a_i}^{a_j} dN = \int_{a_i}^{a_j} \frac{1}{D \cdot \Delta K^m} da \quad (2.17)$$

gdje je N broj promjena naprezanja od a_0 do a_c . Kada dubina pukotine dosegne kritičnu vrijednost a_{cr} , pretpostavlja se otkazivanje.

Prilikom procjene širenja pukotine pomoću mehanike loma, veliku ulogu u određivanju perioda širenja pukotine ima procjena početne dubine pukotine a_i . Kod proračuna širenja pukotine AW zavarenih detalja, BS7910 [144] preporučuje početnu dubinu pukotine a_i između 0,1 i 0,25 mm. Pojedini autori za dubinu početne pukotine preporučuju od $a_i = 0,01$ mm do 0,05 mm [91] ili čak 0,15 mm, kako preporučuje IIW [96]. Ove veličine pukotina su približne mikro strukturalnim svojstvima materijala. Obično je kod čelika veličina zrna približno 0,01 mm pa nema smisla pretpostavljati dubinu početne pukotine ispod te vrijednosti.

2.8 Pouzdanost kod umora

2.8.1 Uvod

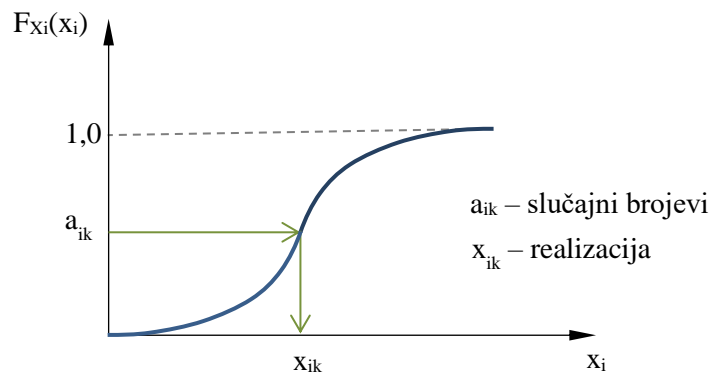
Pouzdanost se definira kao sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da ispuni sve temeljne zahtjeve tijekom proračunskog životnoga vijeka za koji je projektirana. Pouzdanost je izražena probabilističkim izričajem u vidu vjerojatnosti otkazivanja. Ona pokriva sigurnost, uporabljivost i trajnost konstrukcije [9]. Obzirom na brojne neizvjesnosti koje se javljaju tijekom postupka procjene umora, probabilistički pristup često predstavlja racionalno rješenje. Izvori neizvjesnosti se najčešće kategoriziraju kao fizikalne neizvjesnosti, neizvjesnosti kod mjerenja, statističke neizvjesnosti zbog ograničenog broja mjerenja te neizvjesnosti modela zbog različitih nesavršenosti i idealizacija. Razvojem metoda pouzdanosti konstrukcija i metoda akumulacije oštećenja kod umora, postalo je moguće prilikom procjena životnog vijeka elemenata izloženih umoru uzimati u obzir i spomenute neizvjesnosti. U kasnim 80-im godinama objavljeni su brojni radovi koji predlažu kompletnu metodologiju za procjenu životnog vijeka elemenata izloženih umoru pomoću probabilističkih metoda [145]. Ranije su se ove metode uglavnom koristile za van obalne konstrukcije (*engl. offshore structures*), a kasnije su se sve više počele primjenjivati i za procjene umora čeličnih [146], [147]. Sveobuhvatan pregled literature postojećih metoda pouzdanosti kod umora konstrukcija cestovnih i željezničkih mostova dostupni su u [148,149].

Probabilistički modeli oslanjaju se na teoriju vjerojatnosti kojom se modeliraju neizvjesnosti svojstvene stvarnim podacima. Prvi korak u postavljanju probabilističkog modela je najčešće definiranje funkcije graničnog stanja $g(x)$. Funkcija graničnog stanja može biti definirana kao $g(x) > 0$, što znači da je granično stanje zadovoljeno, a $g(x) < 0$ znači otkazivanje konstrukcije ili konstrukcijskog elementa, dok $g(x) = 0$ predstavlja plohu otkazivanja. Opći oblik funkcije graničnog stanja se može napisati kao:

$$g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.18)$$

U izrazu 2.18 $g(x)$ je vektor baznih varijabli. Bazne varijable predstavljaju osnovne veličine koje karakteriziraju ponašanje konstrukcije, elementa ili detalja i označavamo ih kao $x = (x_1, \dots, x_n)$, gdje n predstavlja njihov broj. Bazne varijable mogu biti međusobno ovisne ili neovisne te obuhvaćaju ranije spomenute nepouzdanosti. Bazne varijable prate određenu teorijsku funkciju raspodjele vjerojatnosti, a dijele se na bazne varijable na strani otpornosti konstrukcije ili konstrukcijskog elementa i bazne varijable na strani djelovanja. Pregled

najčešće korištenih funkcija raspodjela za različite modele opterećenja i otpornosti dan je u [146]. Funkcijom raspodjele se definira krivulja vjerojatnosti gdje vjerojatnost realizacije x_{ik} slučajne varijable leži između određene minimalne i maksimalne vrijednosti (slika 2.36). Površina ispod funkcije raspodjele do promatrane točke x_{ik} je vjerojatnost realizacije slučajne varijable.



Slika 2.36. Slučajni brojevi na primjeru funkcije raspodjele [150]

U literaturi postoje brojne probablističke studije oštećenja kod umora i procjene životnoga vijeka mostova. Ni i suradnici [151] razvili su probablistički model za procjenu pouzdanosti čeličnih mostova na temelju podataka dugoročnog monitoringa konstrukcija. U radu integriraju raspodjelu vjerojatnosti razlika Hot Spot naprezanja s probablističkom formulacijom Minerovog pravila. Novije procjene umora čeličnih mostova pomoću bilinearne S-N krivulje mogu se pronaći i u [152,153]. Model opterećenja određuje njegova veličina i učestalost pojave, dok se model otpornosti dobije pomoću ispitivanja uzoraka izloženih umoru. U nastavku su ukratko prikazane određene metode analiza otpornosti zavarenih detalja izloženih umoru bazirane na teoriji vjerojatnosti.

2.8.2 S-N metoda

Kako je već spomenuto, S-N metoda predstavlja najrašireniju metodu procjene umora, gdje S-N krivulja predstavlja ovisnost između razlika naprezanja konstantnih amplituda i broja promjena naprezanja do otkazivanja. Ukoliko se radi o promjenjivim amplitudama, koristi se Minerovo pravilo. Oštećenje D_n pri n promjena naprezanja se može napisati kao [154]:

$$D_n = E(n) \left[\frac{1}{K} E[\Delta\sigma^m] \right] \quad (2.19)$$

$$E[\Delta\sigma^m]_A^B = \int_A^B s^m f_{\Delta\sigma}(s) ds \quad (2.20)$$

gdje su:

$E [..]$ očekivanje,

$f_{\Delta\sigma}(s)$ funkcija gustoće vjerojatnosti razlika napreznja $\Delta\sigma$,

K i m parametri materijala.

Kao i u determinističkom pristupu, otkazivanje nastupa kada je D_n jednak jedinici. Utjecaj geometrije zavara, zaostala napreznja i varijacija napreznja kroz debljinu ploče su implicitno uključeni u vrijednosti K i m . Utjecaji faktora poput debljine ploče, okoliša, oštrog ruba zavara, uključeni su kroz određene korekcije osnovnih S-N krivulja. Funkcija graničnog stanja može se napisati kao:

$$g(\mathbf{X}, t) = D_{cr} - D_n \quad (2.21)$$

gdje su:

X vektor slučajne varijable,

t vrijeme,

D_{cr} Minerova suma oštećenja pri otkazivanju,

D_n je oštećenje kod n ciklusa.

Primjenom metoda inženjerstva pouzdanosti moguće je izračunati vjerojatnost otkazivanja tijekom životnoga vijeka konstrukcijskog detalja koja se onda mogu koristiti primjerice, kao temelj za donošenje odluka za održavanje konstrukcije.

2.8.3 Mehanika loma

Postoji veliki broj probabilističkih istraživanja umornosti zavarenih čeličnih konstrukcija pomoću mehanike loma [17]. Na temelju podataka iz nerazornih ispitivanja, Zhao i Haldar [155] predložili su probabilistički model temeljen na mehanici loma razmatrajući različite neizvjesnosti poput dubine inicijalne pukotine, svojstava materijala i broja ciklusa napreznja. Lukić i Cremona [156] predlažu probabilističke metode procjene čeličnih detalja temeljenih na mehanici loma. Righiniotis and Chryssanthopoulos [157] su proveli istraživanje o primjeni mehanike loma za procjenu životnoga vijeka kod umora zavarenih detalja s inicijalnim pukotinama uz pretpostavku bilinearnog zakona rasta pukotine. Wang i suradnici [158] prezentirali su metodu za procjenu i ažuriranje pouzdanosti kod umora postojećih čeličnih mostova. Koristili su nerazorne tehnike inspekcije i Bayesov teorem koji je primijenjen na

probabilističkoj metodi mehanike loma. Funkcija graničnog stanja se kod mehanike loma može definirati kao:

$$g(X, t) = a_{cr} - a(t) \quad (2.22)$$

gdje su:

- X vektor baznih varijabli,
- a_{cr} granična dubina pukotine (npr. debljina ploče)
- $a(t)$ dubina pukotine nakon određenog vremena t .

Detaljnije o probabilističkim postupcima baziranim na mehanici loma se može pronaći u literaturi [154].

2.8.4 Monte Carlo simulacija

Jedna od metoda u teoriji vjerojatnosti koja se također primjenjuje i u procjenama životnog vijeka zavarenih detalja izloženih umoru je Monte Carlo simulacija. Inženjeri ju vrlo dobro prihvaćaju jer je razumljiva i pristupačna [150]. Monte Carlo simulacija je stohastička metoda kojom se pomoću slučajnih brojeva i velikog broja izračuna i ponavljanja predviđa ponašanje složenih sustava.

U slučaju determinističkih modela, parametarski model preslikava skup ulaznih parametara u jednu izlaznu vrijednost – rješenje. Dakle, postoji određeni broj ulaznih parametara i nekoliko jednadžbi koji koriste te parametre kako bi dale određenu izlaznu vrijednost. Bez obzira na broj ponavljanih proračuna, uvijek se dobiva jednako rješenje.

Za razliku od determinističkih modela, stohastičkim procjenama se može izračunati bilo koji realizacija (rješenja), a svaka od njih matematički je jednako "točna". Dakle, Monte Carlo simulacija je metoda iterativnog ponavljanja proračuna determinističkoga modela koristeći ulazne podatke kao slučajne vrijednosti. Na taj način se deterministički model pretvara u stohastički. Simulacija može uključivati i 10000 proračuna modela, što je zadatak koji je u prošlosti bio praktičan samo uz korištenje super računala. Monte Carlo simulacija se još naziva i metoda uzorkovanja (*engl. Sampling method*) zbog toga što su ulazni podatci generirani kao slučajne vrijednosti prema određenim funkcijama raspodjele vjerojatnosti, kako bi se simulirao proces uzorkovanja iz stvarne populacije. Pri tome se nastoji odabrati ona funkcija raspodjele vjerojatnosti ulaznih podataka koja najbliže odgovara već postojećim podacima. Stohastički

model daje rezultate koji pokazuju sve moguće ishode modela. Rezultati se mogu prikazati u grafičkom obliku.

Monte Carlo simulacija provodi se kroz sljedeće korake:

1. Kreiranje parametarskog proračunskog modela
2. Odabir funkcija distribucije vjerojatnosti za sve bazne varijable (ulazni parametri)
3. Generiranje realizacija baznih varijabli – ulazni parametri za stohastički model
4. Proračun parametarskog modela i zapis rezultata
5. Ponavljanje koraka 3. i 4. n broj puta
5. Analiziranje zapisa rezultata koristeći histograme, statistiku, intervale pouzdanosti itd.

U literaturi postoje primjene Monte Carlo simulacije u procjenama umora čeličnih konstrukcija. Monte Carlo simulacije temeljene na linearno elastičnoj Mehanici loma za konstantne amplitude mogu se pronaći u [159–161], dok se primjerice, za simulacije cikličkih ispitivanja uzoraka mogu pronaći u [129].

2.9 Zaključak

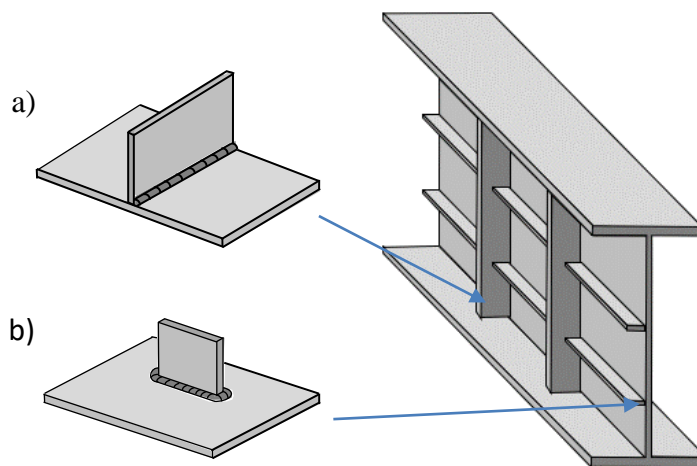
Umor materijala i konstrukcija je veoma složen mehanizam otkazivanja uzrokovan ciklički promjenjivim naprezanjima. U zavarenim konstrukcijama otkazivanje umorom obično nastupa u zavarenim detaljima na mjestima zavara. Osim što sadrže geometrijske i materijalne diskontinuitete, zavari predstavljaju i naglu promjenu geometrije, te mjesta visokih vlačnih zaostalih naprezanja. Oštećenja umorom mogu se dijelom izbjeći izvedbom visoke kvalitete zavara te oblikovnim detaljima. Dodatna otpornost na umor može se postići i postupcima obrade zavara poput HFMI metode. Navedena metoda je jednostavna i ekonomična te ponekad može biti i jedino preostalo rješenje za ostvarivanje zadovoljavajuće otpornosti na umor kada to nije moguće postići klasičnim pravilima projektiranja. Poboljšanje otpornosti na umor HFMI obrađenih detalja se očituje kroz parametre poboljšanja otpornosti na umor, tj. smanjenje koncentracije naprezanja, unos tlačnih zaostalih naprezanja i povećanje tvrdoće na rubu zavara. Za razliku od AW zavarenih detalja, čvrstoća čelika HFMI obrađenih detalja sudjeluje u doprinosu otpornosti detalja izloženih umoru, što je posebice značajno pri upotrebi čelika visoke čvrstoće. Nadalje, u literaturi postoje mnoge metode za procjenu životnoga vijeka zavarenih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Najčešća metoda procjene AW i HFMI obrađenih detalja je S-N metoda. Iako je pogodna za inženjersku praksu, S-N metoda ne uzima eksplicitno u obzir HFMI parametre. Također, spomenuto je da se životni vijek konstrukcijskih detalja sastoji od perioda nastanka i perioda širenja pukotine. S-N metoda promatra ukupan životni vijek detalja do otkazivanja bez razlučivanja granice između ova dva perioda. Budući da HFMI metoda utječe na produljenje perioda nastanka pukotine, prikladno bi bilo periode nastanka i širenja pukotine analizirati odvojeno. Period nastanka pukotine se modelira NS pristupom, a period širenja mehanikom loma. Pomoću dvostupanjskog modela je moguće procijeniti životni vijek AW i HFMI obrađenih zavarenih čeličnih detalja kod umora.

Pouzdana procjena umora zavarenih detalja je i dalje prilično izazovan problem koji uključuje mnoge neizvjesnosti. Unatoč brojnim istraživanjima, postoji i dalje puno nepoznanica u ovom području. Zbog toga je, uz dodatna laboratorijska ispitivanja, potrebno razviti i dodatne determinističke i stohastičke modele za pouzdanu procjenu životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja.

3 ANALIZA POSTOJEĆIH PODATAKA CIKLIČKIH ISPITIVANJA

3.1 Uvod

U ovom poglavlju su iz dostupne literature prikupljeni i statistički analizirani podatci laboratorijskih cikličkih ispitivanja pri konstantnim amplitudama AW i HFMI obrađenih zavarenih konstrukcijskih detalja. Istraživanje se temelji na detaljima s uzdužnim ukrućenjima (*engl. Longitudinal Attachment, LA*) i poprečnim ukrućenjima (*engl. Transversal Attachment, TA*), koji su prikazani na slici 3.1.



Slika 3.1. Primjer detalja s a) poprečnim (TA) i b) uzdužnim (LA) ukrućenjima

Detalji s uzdužnim (LA detalji) i poprečnim (TA detalji) ukrućenjima predstavljaju zavarene detalje unutar realnih konstrukcija. TA detalj predstavlja primjerice donju vlačnu pojasnicu nosača na koju je zavareno vertikalno ukrućenje. LA detalj može predstavljati završetak uzdužnog ukrućenja u konstrukciji (slika 3.1.). Budući da zavari čine integralni dio konstrukcije na koju su ukrućenja zavarena, ovakvi detalji uzrokuju visoke koncentracije naprezanja, iako zavari i ukrućenja sami ne prenose opterećenje. Debljina osnovne ploče LA i TA detalja koja prenosi opterećenje također ima utjecaj na otpornost na umor. Povećanjem debljine glavne ploče se smanjuje otpornost zavarenih detalja na umor [8]. U slučaju LA detalja, otpornost na umor se također smanjuje i povećanjem duljine ukrućenja [8].

Prikupljanjem rezultata laboratorijskih ispitivanja uspostavljena je baza podataka AW i HFMI obrađenih konstrukcijskih detalja različitih kvaliteta čelika, debljina elemenata i uvjeta opterećenja. Baza podataka ispitivanja je dana u Prilogu A. Statističkom analizom rezultata ispitivanja uzoraka na umor detalji su svrstani u kategorije te su određene mjerodavne S-N krivulje. Jedna od preporučenih metoda [162] za analizu podataka ispitivanja kod umora je regresijska analiza, koja je primijenjena i u ovom istraživanju. Zbog širokog spektra različitih geometrija uzoraka i uvjeta opterećenja, provedena je regresijska analiza zasebno za svaku seriju ispitivanja. Baza podataka dostupnih ispitivanja iz literature se također koristi i kao podloga za planiranje i provedbu vlastitih laboratorijskih ispitivanja.

3.2 Pregled prikupljenih rezultata i statistička analiza

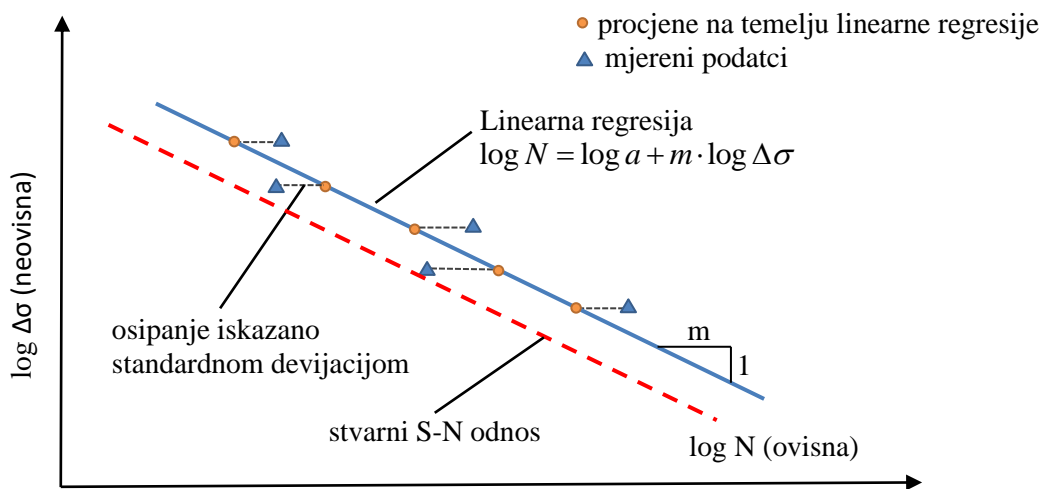
Pregled laboratorijskih ispitivanja s pripadajućim izvorima iz literature i osnovnim informacijama prikazani su u tablicama 3.1 – 3.4. Baza podataka je izrađena za promatrane detalje po uzoru na rad [163] te je ažurirana dodatnim rezultatima ispitivanja HFMI obrađenih detalja te rezultatima ispitivanja AW detalja koja tamo nisu obuhvaćena. Podatci su prikupljeni iz 77 skupa ispitivanja te su razvrstani prema vrsti detalja (LA ili TA) i stanju obrade (AW ili HFMI). U tablicama su navedene nominalne granice popuštanja čelika, f_y , debljine elemenata, t i omjeri naprezanja, R . Uzorci iz promatranih ispitivanja su opterećeni uzdužnim cikličnim naprezanjima konstantnih amplituda. Rezultati prikupljenih ispitivanja su prikazani u Prilogu A, a sastoje se od prikaza vrijednosti nominalnih razlika naprezanja, $\Delta\sigma$ i pripadajućeg broja ciklusa do otkazivanja, N . Prikazani rezultati su raspršeni budući da se, primjerice, za određeni tip detalja iste debljine ploče i dalje može razlikovati geometrija kod različitih autora te se također ispitivanja uzoraka kod različitih autora ne provode u potpuno identičnim uvjetima. Zbog toga se rezultati prikazuju u dvostrukom logaritamskom mjerilu.

Prikupljeni rezultati su statistički analizirani. Kako bi se postigla dosljedna metoda usporedbe rezultata ispitivanja uzoraka na umor, primjenjuje se postupak statističke analize na svaki skup rezultata ispitivanja. Najčešći pristup za analizu podataka ispitivanja kod umora je određivanje S-N krivulja linearnom regresijom uzimajući u obzir $\log N$ i $\log \Delta\sigma$ kao ovisne varijable [162].

Procedura statističke analize se sastoji od dva koraka:

- Linearna regresijska analiza s obje varijable i fiksnim nagibom krivulje ($m = 3$ za AW detalje i $m = 5$ za HFMI obrađene detalje)
- Određivanje karakteristične čvrstoće kod umora pri $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusa, za 95% vjerojatnosti preživljavanja ($S_{C,95\%}$)

Regresijska analiza kao statistička metoda se primjenjuje kako bi se evaluirao odnos između nezavisne i zavisne varijable (slika 3.2). Regresijskom analizom je moguće utvrditi odnos interaktivnih parametara poput razlike naprezanja, $\Delta\sigma$ i broja promjena ciklusa, N . Razlika naprezanja smatra se nezavisnom varijablom, dok je zavisna varijabla broj ciklusa. Jednadžba najprikladnijeg prolaska linije kroz raspršene točke, izražava liniju regresije. Interval pouzdanosti definira vjerojatnost da se ispitivanja kod umora na sličnim detaljima nalaze unutar definiranih granica. Procedura statističke analize linearnom regresijom prikazana je u [162,164].



Slika 3.2. Linearna regresija s 50% i 95% vjerojatnosti preživljavanja [162]

Tablica 3.1. Laboratorijska ispitivanja AW-LA detalja

Oznaka serije ispitivanja	Izvor	Materijal	f_y [MPa]	t [mm]	R	n	$S_{C,95\%}$ [MPa]
LA_AW_S355_t5_01	[40]	S355	355	5	0,1	5	56,47
LA_AW_S355_t8_01	[40]	S355	355	8	0,1	5	72,56
LA_AW_S355_t5_02	[40]	S355	355	5	0,1	11	85,77
LA_AW_S800_t8_01	[38]	S800	700	8	0,05	17	86,25
LA_AW_16Mn_t8_01	[165]	16Mn	390	8	0,1	9	101,85
LA_AW_16Mn_t8_02	[38]	16Mn	390	8	0,1	9	104,88
LA_AW_SM400A_t10_01	[166]	SM400A	400	10	0,1	10	73,37

Tablica 3.2. *Laboratorijska ispitivanja HFMI obrađenih LA detalja*

Oznaka serije ispitivanja	Izvor	Materijal	f_y [MPa]	t [mm]	R	n	$S_{C,95\%}$ [MPa]
LA-HFMI-S355-t5-01	[41]	S355	355	5	0,1	13	105,67
LA-HFMI-S355-t5-04	[167]	S355J0	355	5	0,1	10	136,68
LA-HFMI-S355-t5-05	[40]	S355J0	355	5	0,3	5	84,37
LA-HFMI-S355-t5-06	[122]	S355J0	355	5	0,1	10	131,81
LA-HFMI-S355-t8-01	[168]	S355	355	8	0,1	4	88,36
LA-HFMI-S355-t8-02	[40]	S355	355	8	0,1	5	134,16
LA-HFMI-S355-t8-03	[40]	S355J0	355	8	0,3	5	84,37
LA-HFMI-S355-t8-04	[122]	S355J0	355	8	0,1	10	131,81
LA-HFMI-S355-t16-01	[169]	S355J2	355	16	0,1	14	115,12
LA-HFMI-S355-t16-02	[169]	S355J2	355	16	0,1	7	82,5
LA-HFMI-S355-t16-03	[169]	S355J2	355	16	0,1	23	111,12
LA-HFMI-S355-t30-01	[169]	S355J2	355	30	0,1	14	123,07
LA-HFMI-S690-t5-01	[41]	S690	690	5	0,1	11	182,87
LA-HFMI-S690-t10-01	[170]	S690QL	690	10	0,1	12	108,65
LA-HFMI-S690-t16-01	[169]	S690QL	690	16	0,1	24	158,13
LA-HFMI-S690-t20-01	[170]	S690QL	690	20	0,1	13	132,13
LA-HFMI-S690-t20-02	[170]	S690QL	690	20	0,5	4	99,06
LA-HFMI-S690-t30-01	[169]	S690QL	690	30	0,1	13	160,19
LA-HFMI-S700-t5-01	[170]	S700MC	700	5	0,1	6	50,16
LA-HFMI-S700-t5-02	[170]	S700MC	700	5	0,5	5	57,72
LA-HFMI-S700-t6-01	[171]	S700	700	6	0,1	6	229,86
LA-HFMI-S700-t6-02	[172]	S700	780	6	0,1	5	94,83
LA-HFMI-S700-t8-01	[168]	S700	700	8	0,1	9	116,59
LA-HFMI-S700-t8-02	[168]	S700	700	8	0,1	7	98,63
LA-HFMI-S700-t10-01	[170]	S700MC	700	10	0,1	17	126,84
LA-HFMI-S700-t12-01	[173]	S700	700	12	0,1	7	157,81
LA-HFMI-S960-t5-01	[41]	S960	960	5	0,1	11	200,48
LA-HFMI-S960-t5-02	[170]	S960MC	960	5	0,1	9	89,38
LA-HFMI-S960-t5-03	[170]	S960MC	960	5	0,1	14	132,36
LA-HFMI-S960-t6-01	[52]	S960	960	6	-1,0	11	228,32
LA-HFMI-S960-t10-01	[170]	S960QL	960	10	0,1	6	156,4
LA-HFMI-S960-t10-02	[170]	S960QL	960	10	0,5	10	113,76
LA-HFMI-S960-t15-01	[170]	S960QL	960	15	0,5	12	113,78

Tablica 3.3. *Laboratorijska ispitivanja AW-TA detalja*

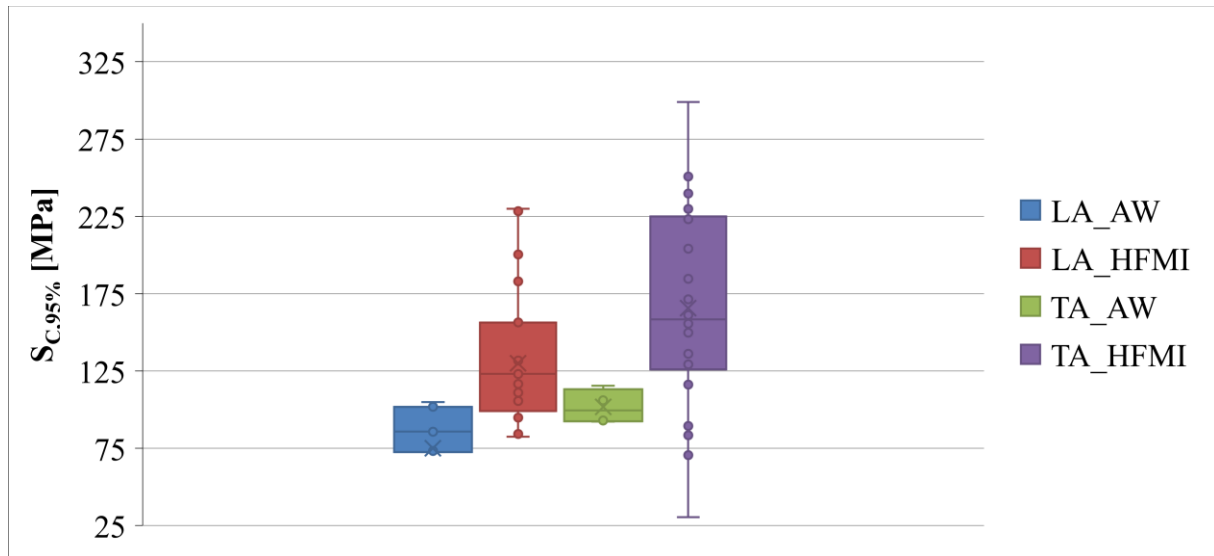
Oznaka serije ispitivanja	Izvor	Materijal	f_y [MPa]	t [mm]	R	n	$S_{C,95\%}$ [MPa]
TA-AW-S235-t10-01	[174]	S235	235	10	-	5	76,0
TA-AW-S235-t18-01	[174]	S235	235	18	-	3	22,84
TA-AW-S420-t10-01	[174]	S420	420	10	-	6	61,46
TA-AW-AH36-t6-01	[66]	AH36	423	6	0,1	5	93,04
TA-AW-AH36-t6-02	[66]	AH36	423	6	-0,43	5	92,34
TA-AW-S690-t6-01	[66]	S690QL	832	6	0,1	7	106,08
TA-AW-S690-t6-02	[66]	S690QL	832	6	-0,43	6	115,55

Tablica 3.4. *Laboratorijska ispitivanja HFMI obrađenih TA detalja*

Oznaka serije ispitivanja	Izvor	Materijal	f_y [MPa]	t [mm]	R	n	$S_{c,95\%}$ [MPa]
TA-HFMI-350W-t8-01	[175]	350W	450	8	0,1	18	184,61
TA-HFMI-AH36-t06-01	[66]	AH36	520	6	-0,43	6	154,58
TA-HFMI-AH36-t20-01	[74]	AH36	520	20	-1	3	207,3
TA-HFMI-AH36-t20-02	[74]	AH36	520	20	0,5	3	70,6
TA-HFMI-AH36-t20-03	[74]	AH36	520	20	0,1	3	149,84
TA-HFMI-E460-t10-01	[176]	E460	614	10	0,1	13	239,85
TA-HFMI-KA-36-t16-01	[177]	KA36	355	16	0,25	3	83,42
TA-HFMI-KA36-t16-02	[177]	KA36	355	16	0,25	3	74,7
TA-HFMI-KA-36-t22-01	[177]	KA36	355	22	0,0	3	171,41
TA-HFMI-KA-36-t30-01	[177]	KA36	355	30	0,0	4	30,46
TA-HFMI-Q235-t8-01	[178]	Q235B	235	8	0,25	6	161,29
TA-HFMI-Q235-t8-02	[178]	Q235B	235	8	-0,5	6	204,03
TA-HFMI-S260-t20-01	[176]	S260	260	20	0,0	9	129,35
TA-HFMI-S355-t5-01	[41]	S355	355	5	0,1	12	155,57
TA-HFMI-S355-t12-01	[179]	S355	355	12	0,1	6	138,68
TA-HFMI-S420-t20-01	[180]	S420	420	20	0,1	8	244,23
TA-HFMI-S460-t12-01	[179]	S460	460	12	0,1	7	136,03
TA-HFMI-S460-t30-01	[181]	S460TM	520	30	0,1	7	116,27
TA-HFMI-S690-t5-01	[41]	S690	690	5	0,1	8	185,91
TA-HFMI-S690-t6-01	[66]	S690	690	6	0,1	5	89,49
TA-HFMI-S690-t20-01	[182]	S690	690	20	0,1	8	131,57
TA-HFMI-S700-t6-01	[171]	S700	700	6	0,1	10	229,86
TA-HFMI-S960-t5-01	[41]	S960	960	5	0,1	11	250,74
TA-HFMI-SBHS500-t12-01	[183]	SBHS500	575	12	0,1	4	223,24
TA-HFMI-SBHS500-t12-02	[183]	SBHS500	575	12	0,3	4	174,84
TA-HFMI-SBHS500-t12-03	[183]	SBHS500	575	12	0,5	4	91,96
TA-HFMI-SM490B-t16-01	[178]	SM490B	352	16	0,4	7	131,49
TA-HFMI-USI355-t5-01	[184]	Usiform 355	355	5	0,1	9	255,61
TA-HFMI-USIFORM700-t5-01	[184]	Usiform 700	700	5	0,1	12	298,89
TA-HFMI-WELD420-t8-01	[185]	WELDOX 420	460	8	0,1	7	252,9

3.3 Analiza podataka dobivenih statističkom analizom

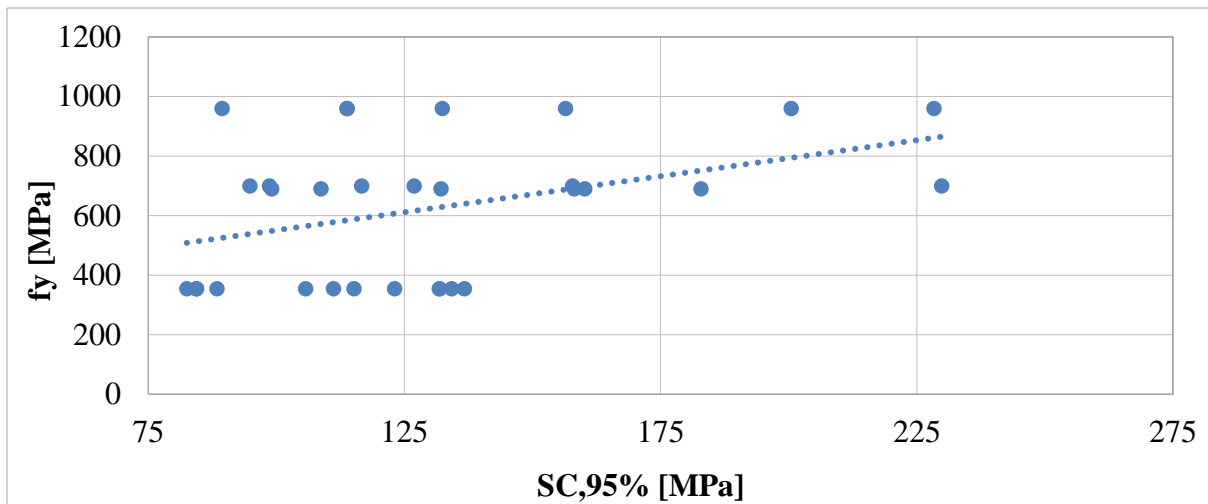
Slika 3.3 prikazuje proračunate vrijednosti $S_{C,95\%}$ za LA-AW i TA-AW detalje te HFMI obrađene LA i TA detalje. Rezultati su prikazani u obliku kutijastih dijagrama gdje se svaki od dijagrama odnosi na pojedini detalj (LA ili TA) i stanje obrade (AW ili HFMI obrađeni detalj). Na slici se uočava značajno povećanje otpornosti HFMI obrađenih zavarenih LA i TA detalja u odnosu na AW stanje.



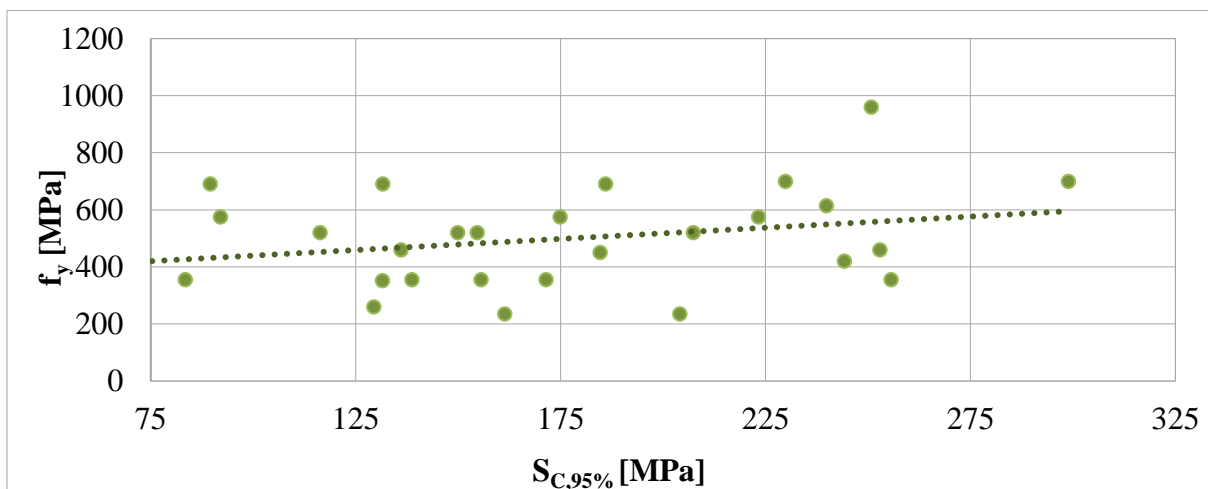
Slika 3.3. Proračunate vrijednosti $S_{C,95\%}$ za AW i HFMI obrađene LA i TA detalje

Iz slike 3.3 je vidljivo da TA detalji imaju nešto veću otpornost na umor u odnosu na LA detalje. Iako je očito povećanje otpornosti na umor za HFMI obrađene detalje, uočava se i veće raspršenje podataka u odnosu na AW detalje. To je iz razloga što su prikupljena ispitivanja različitih materijala, geometrije i uvjeta opterećenja, što značajno utječe na otpornost HFMI obrađenih detalja izloženih umoru. Kako je u ranije spomenuto, kod AW detalja parametri poput kvalitete materijala ne utječu na otpornost na umor, stoga je i raspršenje manje.

Budući da su svi parametri HFMI obrade međusobno ovisni, teško je uspoređivati detalje obzirom na samo jedan parametar. Također kod većine ispitivanja se ne mogu razlučiti svi uvjeti ispitivanja i proizvodnje detalja. Iz toga razloga se promatraju samo trendovi povećanja ili smanjena otpornosti na umor te se zaključci donose samo kvalitativno. Na slikama 3.4 i 3.5 prikazane su proračunate vrijednosti $S_{C,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na granicu popuštanja čelika, f_y . Crtkana plava linija u dijagramu označava liniju trenda (*engl. trendline*).

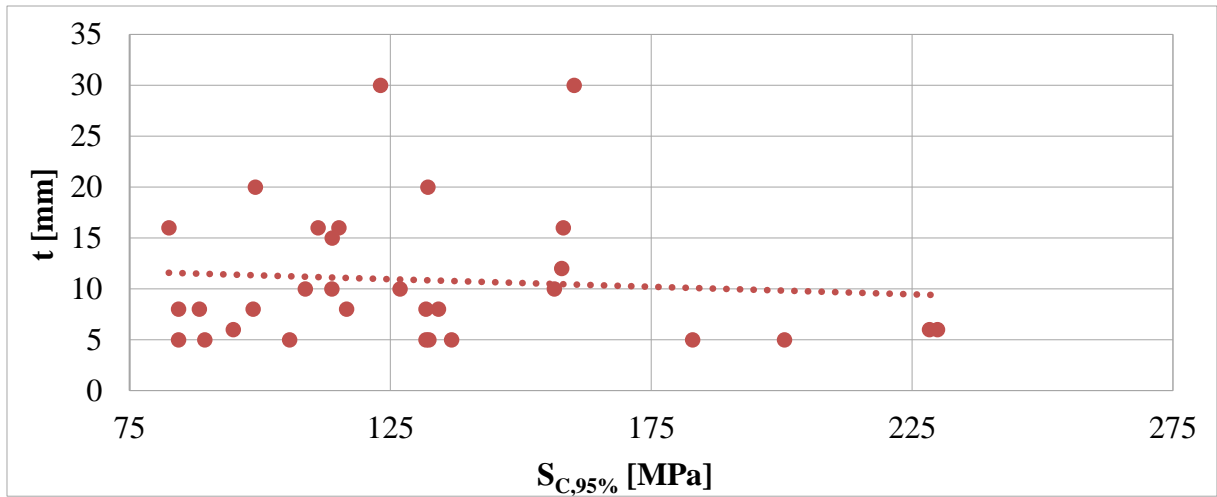


Slika 3.4. Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na granicu popuštanja f_y

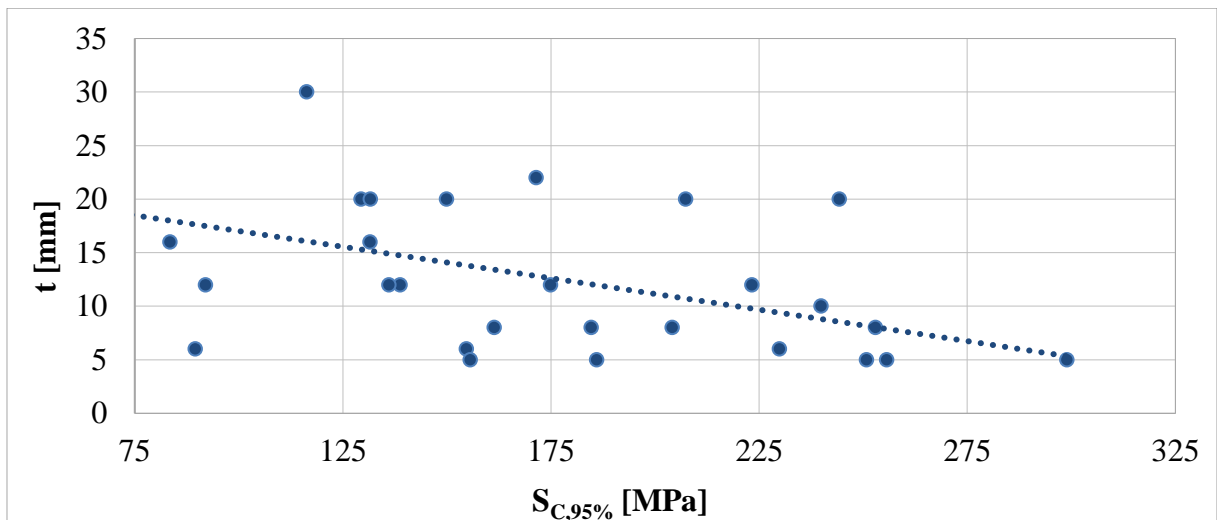


Slika 3.5. Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene TA detalje u odnosu na granicu popuštanja f_y

Na slikama 3.4 i 3.5 uočava se veliko raspršenje u rezultatima jer, osim povećanja granice popuštanja, ostali parametri (debljina elemenata i omjer naprezanja) također utječu na povećanje ili smanjenje otpornosti na umor. Međutim, povećanjem granice popuštanja se uočava se trend povećanja životnoga vijeka detalja izloženih umoru. Na slikama 3.6 i 3.7 su prikazane proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na debljinu osnovne ploče, t. Crtkana plava linija u dijagramu označava liniju trenda (*engl. trendline*).



Slika 3.6. Proračunate vrijednosti $S_{C,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na debljinu osnovne ploče, t



Slika 3.7. Proračunate vrijednosti $S_{C,95\%}$ za HFMI obrađene TA detalje u odnosu na debljinu osnovne ploče, t

Kao i u slučaju uspoređivanja različitih vrijednosti granica popuštanja u odnosu na otpornost na umor, na slikama 3.6 i 3.7 se također uočava raspršenje u rezultatima. Unatoč tome, uočava se trend smanjenja otpornosti na umor s povećanjem debljine elementa. Crtkana plava linija u dijagramu označava liniju trenda (*engl. trendline*).

3.4 Zaključak

U ovom poglavlju su prikupljeni rezultati postojećih dostupnih ispitivanja na umor zavarenih LA i TA detalja te je izrađena baza podataka prikazana u Prilogu A. Provedena je statistička analiza istih te su određene karakteristične otpornosti na umor za 95% vjerojatnosti preživljavanja, $S_{C,95\%}$, pri broju ciklusa od $N = 2 \cdot 10^6$. Statistička analiza je za detalje u AW stanju provedena s nagibom od $m = 3$, dok kod HFMI obrađenog stanja prikladniji nagib od $m = 5$. Pokazano je da je LA detalj iz aspekta umora nepovoljniji u odnosu na TA detalj, što je u skladu i s europskom normom EN 1993-1-9 [90].

Također je prikazan utjecaj pojedinih HFMI parametara poboljšanja na životni vijek kod umora. U dijagramima koji prikazuju utjecaj pojedinih HFMI parametara na životni vijek detalja kod umora se uočava veliko raspršenje. Jedan od razloga je taj što zavareni detalji kod različitih autora nisu ispitivani pri istim uvjetima. Drugi je razlog taj da osim promatranog HFMI parametara poboljšanja, i ostali parametri također utječu na povećanje ili smanjenje otpornosti na umor. Međutim, ipak se uočavaju određeni trendovi pa se mogu donijeti određeni kvalitativni zaključci. Primjerice, uočava se trend povećanja životnoga vijeka obrađenih zavarenih detalja povećanjem kvalitete čelika (granice popuštanja). Također, uočava se i trend smanjenja otpornosti na umor s povećanjem debljine elementa te povećanje otpornosti na umor smanjenjem omjera naprezanja, R .

Prikupljeni i analizirani podaci se koriste u daljnjem istraživanju za razvoj i vrednovanje determinističkoga, a potom i stohastičkoga teorijskog modela za procjenu umora AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja. Također služe i kao osnova za planiranje i provedbu vlastitih laboratorijskih ispitivanja koja se u daljnjem istraživanju koriste za precizniju kalibraciju determinističkoga, a potom i stohastičkoga modela.

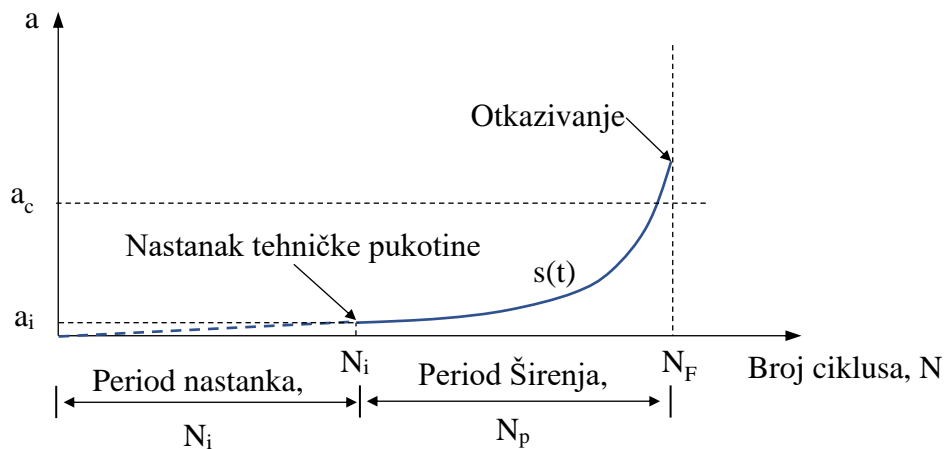
4 DETERMINISTIČKI PRORAČUNSKI MODEL

4.1 Uvod

Kako je objašnjeno u Poglavlju 2, ukupni životni vijek zavarenog čeličnog detalja izloženog umoru, N_F , sastoji se od perioda nastanka pukotine, N_i i perioda širenja pukotine, N_p , odnosno:

$$N_F = N_i + N_p \quad (4.1)$$

U ovom poglavlju je prikazan razvoj i kalibracija dvostupanjskog modela (eng. Two-Stage Model) [44], u daljnjem tekstu TSM model, koji kombinacijom različitih metoda, odvojeno proračunava periode nastanka i širenja pukotine zavarenih detalja izloženih umoru (slika 4.1). Slični modeli se mogu pronaći u [27,125,129,186]. Kako je prikazano na slici, granica između dva perioda je definirana kao tehnički nastanak pukotine dubine a_i . Iako ovaj pristup nije usvojen u normama, pomoću njega je moguće procijeniti životni vijek AW i HFMI obrađenih zavarenih čeličnih detalja kod umora, uzimajući u obzir parametre poboljšanja [44].



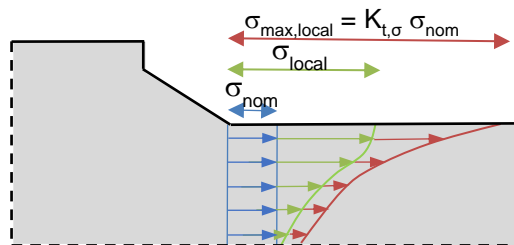
Slika 4.1. Rast dubine pukotine, a u odnosu na broj promjena ciklusa opterećenja, N

Period nastanka pukotine modelira se NS pristupom, a širenje pukotine se modelira mehanikom loma. U nastavku je prikazan razvoj TSM modela, a zatim i kalibracija modela pomoću dostupnih ispitivanja zavarenih čeličnih LA detalja iz literature.

4.2 Razvoj TSM modela

4.2.1 Period nastanka pukotine, N_i

Prvi stupanj se odnosi na proračun perioda nastanka pukotine, N_i pomoću NS pristupa. Prvi korak je definiranje maksimalnih naprezanja $\sigma_{\max,local}$ i deformacija $\varepsilon_{\max,local}$ na rubu zavora, koji se konzervativno mogu proračunati pomoću faktora koncentracije naprezanja i deformacija na rubu zavora ($K_{t,\sigma}$, $K_{t,\varepsilon}$) (slika 4.2). Budući da se HFMI obradom lokalno mijenja geometrija ruba zavora, a time i faktor koncentracije naprezanja, pomoću ovog faktora se može u obzir uzeti promjena geometrije kao prvi HFMI parametar poboljšanja.



Slika 4.2. Maksimalno lokalno naprezanje na rubu zavora

U elastičnom stanju faktori koncentracije naprezanja i deformacije na rubu zavora iznose:

$$K_{\sigma} = K_t = \frac{\sigma_{\max,local}}{\sigma_n} \quad (4.2)$$

$$K_{\varepsilon} = K_t = \frac{\varepsilon_{\max,local}}{\varepsilon_n} \quad (4.3)$$

Deformacija u elastičnom stanju se proračunava prema izrazu:

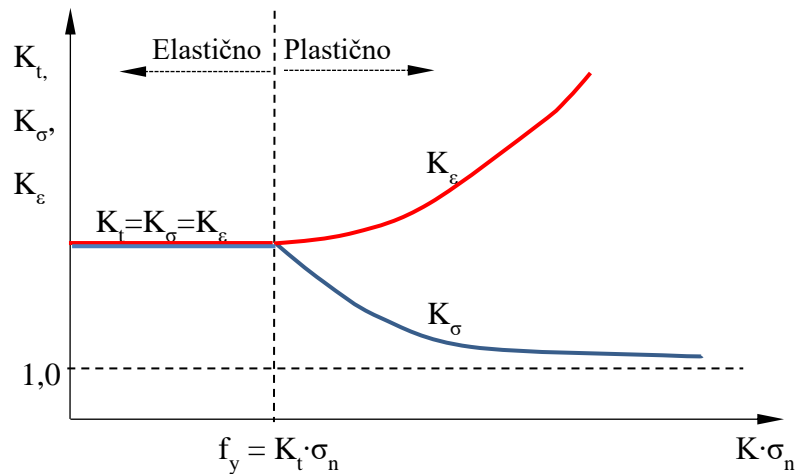
$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma_{el}}{E} \quad (4.4)$$

U elastoplastičnom stanju faktori koncentracije naprezanja i deformacije iznose:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max,local}}{\sigma_n} \quad (4.5)$$

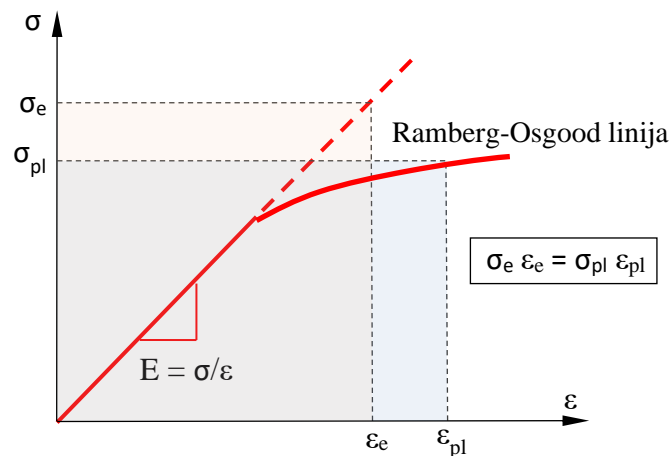
$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max,local}}{\varepsilon_n} = \frac{\varepsilon_{\max,local}}{(\sigma_n/E)} \quad (4.6)$$

Vrijednosti faktora koncentracije naprezanja i deformacija na rubu zavora u elastičnom i elastoplastičnom stanju su prikazani na slici 4.3.



Slika 4.3. Faktori koncentracije naprezanja u elastičnom i plastičnom stanju

Povećanjem nominalnog naprezanja, faktor koncentracije naprezanja K_t ostaje konstantan do početka popuštanja (f_y). Nakon toga, lokalna naprezanja i deformacije nisu više linearni. Nakon popuštanja, faktor koncentracije naprezanja se smanjuje, a faktor deformacija se povećava, odnosno, naprezanje je manje od elastičnog naprezanja, a deformacija veća od elastične deformacije. Kako bi se nelinearna analiza opisala linearnim modelom, koristi se Neuberov izraz [130]. Za svaku elastičnu deformaciju u radnom dijagramu materijala, Neuberov izraz proračunava odgovarajuću elastoplastičnu deformaciju, zadržavajući konstantne iznose crvene i plave površine na slici 4.4.



Slika 4.4. Neuberovo pravilo [130]

Za dano elastično naprezanje, σ_{el} , pomoću Youngovog modula elastičnosti se proračunava odgovarajuća elastična deformacija, ϵ_{el} . Tada se pomoću Neuberovog pravila može u

plastičnom području odrediti odgovarajuća točka koja opisuje nelinearno plastično ponašanje. Ova točka izjednačava ekvivalentno plastično naprezanje i deformaciju na temelju elastičnog naprezanja i deformacije. Prema Neuber-ovom pravilu vrijedi:

$$(K_\sigma \cdot K_\varepsilon)_{\text{elastično}} = (K_\sigma \cdot K_\varepsilon)_{\text{plastično}} \quad (4.7)$$

odnosno,

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon \quad (4.8)$$

Iz čega slijedi:

$$K_t^2 = \frac{\varepsilon_{\max, \text{local}}}{\varepsilon_n} \cdot \frac{\sigma_{\max, \text{local}}}{\sigma_n} = \frac{\varepsilon_{\max, \text{local}}}{\sigma_n / E} \cdot \frac{\sigma_{\max, \text{local}}}{\sigma_n} \quad (4.9)$$

Dakle, naprezanja i deformacije u zavaru u elastoplastičnom stanju prema Neuber-u se proračunavaju prema:

$$\frac{(K_t \cdot \sigma_n)^2}{E} = \sigma_{\max, \text{local}} \cdot \varepsilon_{\max, \text{local}} \quad (4.10)$$

gdje su $\sigma_{\max, \text{local}}$ i $\varepsilon_{\max, \text{local}}$ maksimalno lokalno naprezanje i deformacija na rubu zavora. Dakle, pomoću prethodnog izraza se za dano nominalno naprezanje i faktor koncentracije naprezanja izračunavaju naprezanje i deformacija u elastoplastičnom stanju. Budući da se u okolini ruba zavora nalaze i zaostala naprezanja unesena procesom hlađenja nakon zavarivanja te HFMI metodom, maksimalnom naprezanju se pribraja i vrijednost zaostalog naprezanja, čime se u obzir uzima i drugi parametar HFMI poboljšanja:

$$\frac{(K_t \cdot \sigma_{\max, \text{nominal}} + \sigma_{\text{residual}})^2}{E} = \sigma_{\max, \text{local}} \cdot \varepsilon_{\max, \text{local}} \quad (4.11)$$

Ukupna deformacija elastoplastičnom stanju se sastoji od elastične i plastične komponente:

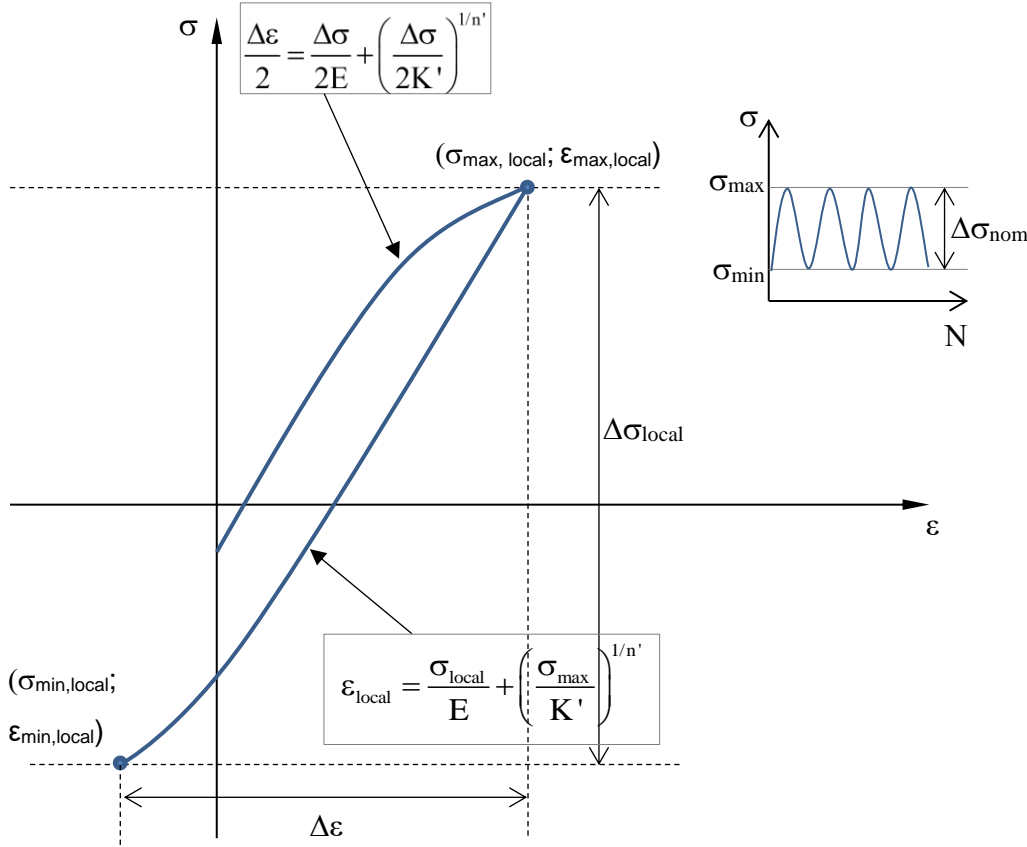
$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a, \text{el}} + \varepsilon_{a, \text{pl}} \quad (4.12)$$

Ukoliko je zavareni detalj ciklični opterećen, u radnom dijagramu materijala nastaje histerezna petlja (slika 4.5) koja se stabilizira nakon 5%-10% ukupnog životnoga vijeka kod umora [125]. Stabilizirani odnos cikličkih naprezanja i deformacija se obično aproksimira Ramberg-Osgood-ovim izrazom [132]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a, \text{el}} + \varepsilon_{a, \text{pl}} = \frac{\sigma_{\text{local}}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\text{local}}}{K'} \right)^{1/n'} \quad (4.13)$$

gdje je ε_a ukupna amplituda deformacija, $\varepsilon_{a, \text{el}}$ elastična amplituda deformacija, $\varepsilon_{a, \text{pl}}$ plastična amplituda deformacija, σ_{local} naprezanje u vrhu zareza, E modul elastičnosti, K' ciklički

koeficijent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija, n' ciklički eksponent očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija. K' i n' su vrijednosti koje se mogu dobiti iz literature ili ispitivanjima.



Slika 4.5. Histerezna petlja [129]

Lokalna maksimalna naprezanja na rubu zavora se u elastoplastičnom stanju proračunavaju pomoću jednadžbi 4.11 i 4.13 koje tvore sustav dviju jednadžbi s dvije nepoznanice, iz kojeg se proračunava maksimalno lokalno naprezanje na rubu zavora, $\sigma_{\max, \text{local}}$. Tako se dobiva prva točka na histereznoj petlji:

$$\frac{(K_t \cdot \sigma_{\max, \text{nominal}} + \sigma_{\text{residual}})^2}{E} = \sigma_{\max, \text{local}} \left(\frac{\sigma_{\max, \text{local}}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\max, \text{local}}}{K'} \right)^{1/n'} \right) \quad (4.14)$$

Nakon što je za jedan smjer opterećivanja određeno maksimalno naprezanje na rubu zavora $\sigma_{\max, \text{local}}$, ista se procedura primjenjuje i za proračun lokalne razlike naprezanja $\Delta\sigma_{\text{local}}$:

$$\frac{(K_t \cdot \Delta\sigma_{\text{nominal}})^2}{E} = (\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon)_{\text{local}} \quad (4.15)$$

Promjenom smjera opterećenja nakon dostizanja maksimalnog naprezanja i deformacije, grana histerezne petlje uključuje i Bauschingerov efekt [133] te slijedi odnos σ - ε koji je dvostruk u

vrijednostima deformacija i naprežanja u odnosu na početnu σ - ε krivulju u prvom smjeru opterećivanja [134]. Razlog tome je što kod promjene smjera opterećenja, element se mora deformirati dvostruko više u odnosu na prvi smjer opterećivanja, kako je opisano izrazom:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (4.16)$$

Jednadžbe 4.15 i 4.16 tvore novi sustav dviju jednadžbi s dvije nepoznanice:

$$\frac{(K_t \cdot \Delta\sigma_{\text{nominal}})^2}{E} = \Delta\sigma_{\text{local}} \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{local}}}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{local}}}{2K'} \right)^{1/n'} \right) \quad (4.17)$$

Iz sustava jednadžbi 4.17 se proračunava lokalna razlika naprežanja $\Delta\sigma_{\text{local}}$ prikazana na slici 4.5. Pri tome lokalno srednje naprežanje iznosi:

$$\sigma_{\text{mean,local}} = \sigma_{\text{max,local}} - \frac{\Delta\sigma_{\text{local}}}{2} \quad (4.18)$$

Period nastanka pukotine se u elastoplastičnom stanju se proračunava iz S-N krivulje deformacije (*engl. S-N deformation curve*). Jednadžba krivulje deformacije je nazvana prema Coffin-Manson-u te uključuje i korekciju srednjeg naprežanja prema Morrow-u [129] i glasi:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{\text{local}}}{2} = \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_{m,\text{local}}}{E} \right) (2N_r)^b + \varepsilon_f' (2N_r)^c \quad (4.19)$$

gdje je $\Delta\varepsilon_{\text{local}}$ ($\Delta\varepsilon_{\text{local}} = \Delta\sigma/E$) lokalna razlika naprežanja za puni reverzibilni ciklus, N_r broj promjena smjera opterećenja (1 promjena = $\frac{1}{2}$ ciklusa, $N = 2N_r$), σ_f' ciklički koeficijent čvrstoće na umor, ε_f' koeficijent duktilnosti umora, b eksponent čvrstoće kod umora, c eksponent duktilnosti kod umora, $\sigma_{m,\text{local}}$ srednje naprežanje. Preporuke za tehničku dubinu pukotine na kraju perioda nastanka pukotine su prikazane u Poglavlju 1. U sklopu ovog modela se usvaja dubina tehničke pukotine u iznosu od $a_i = 0,5$ mm [44].

4.2.2 Period širenja pukotine, N_p

Drugi stupanj TSM modela odnosi se na proračun perioda širenja pukotine, N_p , koji se izračunava pomoću mehanike loma. Integrirajući Paris-Erdoganovu jednadžbu po dubini pukotine (od inicijalne pukotine a_i do kritične dubine a_c , kada nastupa otkazivanje), može se izračunati širenje pukotine zavarenog detalja kod umora:

$$N_p = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C \cdot \Delta K^m} = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C \cdot (\Delta\sigma \cdot Y \cdot M_k(a) \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m} \quad (4.20)$$

odnosno,

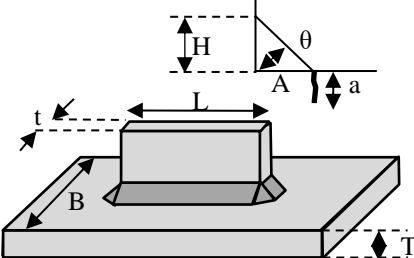
$$N_p = \frac{2}{(m-2) \cdot C \cdot (M_k(a) \cdot Y \cdot \Delta\sigma)^m \cdot \pi^{m/2}} \cdot \left[\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right] \quad (4.21)$$

gdje su C i m parametri materijala. Veličina C je svojstvena svakom materijalu posebno, a eksperimentalni rezultati pokazuju da se za većinu zavarenih usvaja $m = 3$ [27,126]. U sklopu ovog modela, usvojena dubina inicijalne pukotine je dubina pukotine na kraju perioda nastanka pukotine, odnosno $a_i = 0,5$ mm. Otkazivanje uzorka, odnosno, kraj perioda širenja pukotine nastaje pri kritičnoj dubini pukotine od a_c . Postoje različite metode kojima se može odrediti kritična dubina pukotine, ali to u ovom slučaju nije potrebno. Naime, najveći udio perioda širenja pukotine se odnosi na male dubine pukotine. Za čeličnu ploču debljine 8 mm, nije bitno je li kritična dubina pukotine određena kao 5 mm, 6 mm ili 7 mm budući da je zanemariv broj ciklusa razlika naprežanja između tih dubina. U sklopu razvoja i primjene TSM modela, usvaja se kritična dubina pukotina u iznosu od $a_c = 5$ mm. Kako bi se u obzir uzela koncentracija naprežanja u vrhu pukotine na rubu zavara, koristi se faktor povećanja $M_k(a)$. Proračun faktora povećanja se može provesti pomoću metode konačnih elemenata, standardnim metodama mehanike loma te analitički [126]. U sklopu TSM modela usvaja se analitički proračun faktora povećanja $M_k(a)$ prema [126]. Prema navedenoj literaturi, $M_k(a)$ iznosi:

$$M_k = C \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^k ; M_k \geq 1,0 \quad (4.22)$$

gdje je a dubina pukotine. Geometrijske veličine za proračun faktora povećanja za LA i TA detalje su prikazani u tablicama 4.1 i 4.2.

Tablica 4.1. Geometrijske veličine LA detalja za proračun $M_k(a)$ [126]

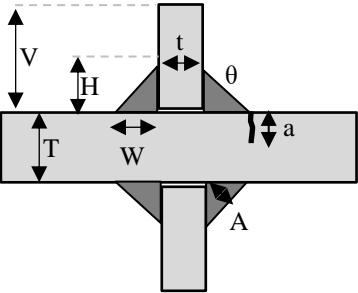
	Dimenzija	min	max
	L/B	5	40
	B/T	2,5	40
	$\theta/45^\circ$	0,67	1,33
	t/T	0,25	2

Vrijednosti C i k za uzorke s uzdužnim ukrućenjima dane su izrazima 4.23 i 4.24.

$$C = 0,9089 - 0,2357 \left(\frac{t}{T} \right) + 0,0249 \left(\frac{L}{T} \right) - 0,00038 \left(\frac{L}{T} \right)^2 + 0,0186 \left(\frac{B}{T} \right) - 0,1414 \left(\frac{\theta}{45^\circ} \right) \quad (4.23)$$

$$k = -0,02285 + 0,0167 \left(\frac{t}{T} \right) - 0,3863 \left(\frac{\theta}{45^\circ} \right) + 0,1230 \left(\frac{\theta}{45^\circ} \right)^2 \quad (4.24)$$

Tablica 4.2. Geometrijske veličine TA detalja za proračun $M_k(a)$ [126]

	Dimenzija	min	max
	L/B	0,2	1
B/T	0,2	1	
θ	15°	60°	
A/T	0,175	0,72	
t/T	0,125	2 (4)	

Vrijednosti C i k za TA detalje dane su izrazima 4.25 i 4.26.

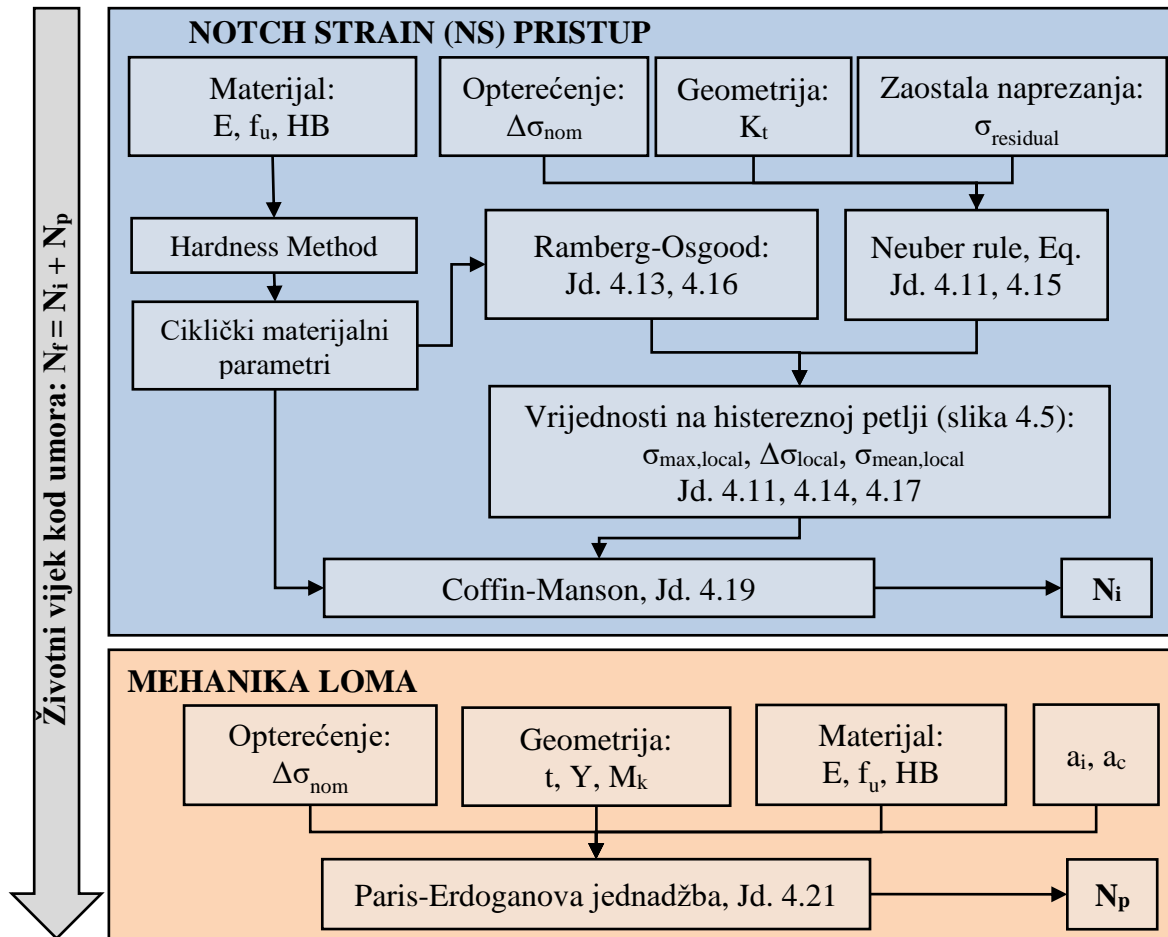
$$C = 0,8068 - 0,1554 \left(\frac{H}{T} \right) + 0,0429 \left(\frac{H}{T} \right)^2 + 0,0794 \left(\frac{W}{T} \right) \quad (4.25)$$

$$k = -0,1993 - 0,1839 \left(\frac{H}{T} \right) + 0,0495 \left(\frac{H}{T} \right)^2 + 0,0815 \left(\frac{W}{T} \right) \quad (4.26)$$

Parametar Y u jednadžbama 4.20 i 4.21 predstavlja korekcijski faktor geometrije. Za proračun se može pretpostaviti srednja vrijednost parametara Y [27]. U sklopu TSM modela, konzervativno se usvaja vrijednost od $Y = 1,12$.

4.2.3 Dijagram tijeka TSM modela

Slika 6.6 prikazuje dijagram TSM modela na temelju prikazanih postupaka i metoda za proračun perioda nastanka i perioda širenja pukotine.



Slika 4.6. Dijagram tijeka TSM modela

U nastavku je prikazana primjena, vrednovanje i parametarska analiza determinističkoga TSM modela za proračun LA detalja. Vrednovanje je provedeno na temelju ispitivanja sličnih detalja iz literature. Proračuni su provedeni za AW i za HFMI obrađene detalje. Parametarska analiza TSM modela je provedena kako bi se ispitaio utjecaj različitih parametara poboljšanja na životni vijek kod umora.

4.3 Primjena, vrednovanje i parametarska analiza TSM modela

4.3.1 Uvod

Kako bi se istražilo je li razvijeni TSM model prikladan za proračun životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih zavarenih čeličnih detalja izloženih jednoosnom umoru, provodi se primjena TSM modela, a rezultati se potvrđuju ispitivanjima sličnih detalja iz literature. Kako bi se utvrdili utjecaji pojedinih HFMI parametara poboljšanja, provodi se i parametarska analiza. Primjena, vrednovanje i parametarska analiza se baziraju na zavarenim LA detaljima.

4.3.2 Primjena i vrednovanje TSM modela

U svrhu primjene TSM modela, za proračun se pretpostavlja čelična ploča S690 nominalne debljine 8 mm. HFMI parametri su preuzeti iz literature, a proračunati životni vjekovi su potvrđeni rezultatima cikličkih ispitivanja iz literature [38,40,165,168]. TSM model je kalibriran za AW i HFMI obrađeno stanje. Nakon provedenog proračuna i vrednovanja TSM modela, provedena je i parametarska analiza. Kako je ranije spomenuto, granica između perioda nastanka (N_i) i perioda širenja pukotine (N_p) je definirana kao tehnički nastanak pukotine, pri dubini pukotine a_i . U literaturi [60,167] je prikazano da tehnička pukotina kod AW zavarenih detalja nastaje otprilike pri 10% ukupnog životnoga vijeka kod umora. U slučaju HFMI obrađenih detalja izrađenih od čelika visoke čvrstoće S690, period nastanka pukotine se može produljiti sve do 90% ukupnog životnoga vijeka kod umora [60]. U svrhu primjene i vrednovanja modela inicijalna pukotina se usvaja kao $a_i = 0,5$ mm.

4.3.2.1 Ciklički materijalni parametri za NS pristup

NS pristup zahtijeva definiranje cikličkih materijalnih parametara, koji se inače određuju ispitivanjima. Međutim, u literaturi postoje razvijene korelacije između cikličkih materijalnih parametara i podataka pri monotonom vlačnom opterećenju (*engl. monotonic tensile data*) [140]. Odabrane su tri metode za određivanje jednoosnih cikličkih parametara za procjenu perioda nastanka pukotine AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja – Uniform Material Law (UML), Extended UML i HM. Budući da je eksperimentalno određivanje cikličkih materijalnih parametara dugotrajno i skupo, navedene korelacije se mogu koristiti u nedostatku skupih cikličkih ispitivanja.

Odabrane metode mogu uzeti u obzir tvrdoću materijala kao trećeg HFMI parametara poboljšanja kroz promjenu tvrdoće (HM) ili indirektno kroz lokalnu promjenu vlačne čvrstoće na mjestu HFMI obrade (UML u Ext-UML). Ciklični materijalni parametri prema opisanim metodama su prikazani u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Ciklički materijalni parametri za NS pristup

Parametar	UML [27]	Ext-UML [142]	HM [143]
K'	$1,61 f_u$	$\sigma_f' / (\varepsilon_f')^n$	$1,65 f_u$
n'	0,15	b/c	0,15
σ_f'	$1,5 f_u$	$f_u (1 + \psi)$	$4,25HB + 225$
ε_f'	$0,59 \psi$	$0,58 \psi + 0,01$	$1/E(0,32(HB)^2 - 487(HB) + 191000)$
b	-0,087	$-\log(\sigma_f' / \sigma_E) / 6$	-0,057 to -0,14
σ_E	$0,45 f_u$	$f_u(0,32 + \psi) / 6$	-
c	-0,58	-0,58	-0,39 to 1,04
ψ	1,0 for $(f_u/E) \leq 3 \cdot 10^{-3}$ 1,375 – 125 (f_u/E) for $(f_u/E) > 3 \cdot 10^{-3}$ and ≥ 0	$0,5(\cos(\pi(f_u - 400)/2200) + 1)$	-

Proračuni u ovom istraživanju pokazuju da se UML, Ext-UML i HM da se dobro slažu s rezultatima iz literature za AW stanje [140]. Međutim, kako je prikazano kasnije, s prikladnom kalibracijom eksponenta čvrstoće kod umora, *b* i eksponenta duktilnosti kod umora, *c*, HM je prikladna i za AW i za HFMI obrađeno stanje.

4.3.2.2 Geometrijski i materijalni parametri za mehaniku loma

Materijalni parametri za Paris-Erdoganovu jednadžbu su izvedeni iz mjerenja širenja pukotine prilikom cikličkog ispitivanja. Materijalni parametri za modeliranje širenja pukotine se usvajaju kao $m = 3$ i $C = 3,5 \cdot 10^{-12}$. Faktor lokalnog povećanja naprezanja $M_k(a)$ se računa prema [126]. Parametar $Y(a)$ je u funkciji dubine pukotine, ali je moguće usvojiti srednju vrijednost ukoliko Y značajnije ne varira po dubini pukotine [27,126]. U okviru ovog istraživanja, pretpostavlja se $Y = 1,12$ [187]. Integracija je provedena postupnom integracijom u inkrementima dubine pukotine i broja ciklusa naprezanja, paralelno proračunavajući $M_k(a)$. Korak inkrementa dubine pukotine iznosi $\Delta a = 0,01$ mm. Proračun je proveden na mjestu najvećeg naprezanja s početnom veličinom pukotine koja je jednaka dubini tehničke pukotine $a_i = 0,50$ mm, a kritična dubina pukotine kako je ranije spomenuto iznosi $a_c = 5$ mm.

4.3.2.3 HFMI parametri za proračun i parametarsku analizu

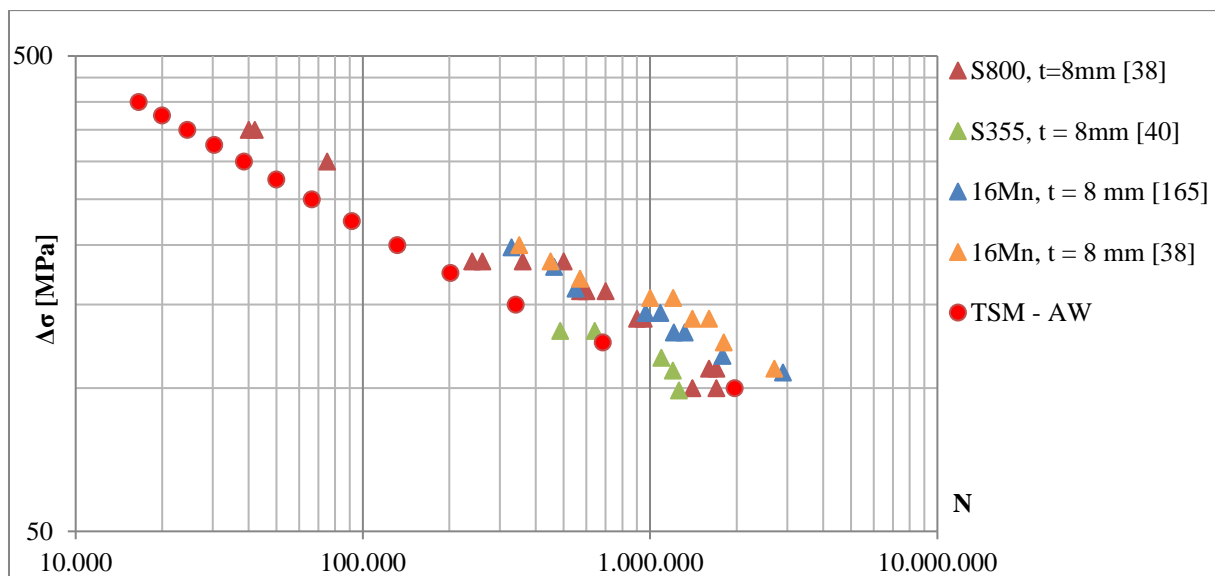
Za LA-AW detalje nominalne debljine 8 mm, faktor koncentracije naprezanja iznosi oko $K_t = 2,69-3,85$ [188]. Za pripadajuće HFMI obrađene detalje, faktor koncentracije naprezanja iznosi $K_t = 1,92-2,17$ [188]. Za proračun su usvojene srednje vrijednosti faktora koncentracije naprezanja, a za parametarsku analizu u daljnjem istraživanju su usvojene gornje i donje granice.

U radu [189], izmjerena zaostala naprezanja na površini ruba zavora u AW stanju za čelik klase S355 su oko 25 MPa, a za čelike klase S690 i S960 su oko 200 MPa. U istoj literaturi, za čelik klase S700, prosječna vrijednost zaostalih naprezanja za AW stanje iznosi oko 470 MPa, a za HFMI obrađeno stanje oko -200 MPa (tlačna naprezanja), sa odstupanjima od ± 150 MPa. Zaostala naprezanja za AW stanje za LA detalj klase S700 [188] iznosi oko 340 MPa (vlačna naprezanja), a za HFMI obrađeni rub zavora iznosi oko -180 MPa (tlačna naprezanja). U literaturi [88], tlačna zaostala naprezanja HFMI obrađenih detalja klase S690 su u rasponu od -540 MPa i -654 MPa. U slučaju čelika klase S960, vrijednosti zaostalih naprezanja su u rasponu od -600 MPa do -800 MPa. U literaturi [89], raspon zaostalih naprezanja na površini materijala za čelik klase S355 iznose od -230 MPa do -270 MPa, a za čelik klase S690 od -500 MPa do -610 MPa. Na temelju navedenog se uočava veliko raspršenje podataka, budući da se pojedine informacije poput procesa zavarivanja, stvarnih mehaničkih karakteristika materijala te ostalih uvjeta proizvodnje ispitanih uzoraka ne mogu eksplicitno potvrditi. Kako bi se odredila promjena tvrdoće HFMI obradom, potrebno je izmjeriti tvrdoće na mjestu plastičnog deformiranja površine materijala prije i poslije obrade. U [88], za kutne zavora kod detalja izrađenih od čelika klase S355 potvrđeno je povećanje tvrdoće sa 180 HV0.05 na 300 HV0.05. U [89], za detalje od čelika klase S355J2+N uočeno je povećanje tvrdoće materijala do 340 HV0.05 na dubini od oko 1 mm, u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala od 209 HV0.05. U literaturi [88], za čelik klase S690QL, tvrdoća u AW stanju iznosi 250 HV0.05, a povećana tvrdoća nakon HFMI obrade iznosi između 300 HV0.05 i HV350. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće u AW stanju za S700 u području ruba zavora je izmjerena kao HB = 230, a za HFMI obrađeno stanje HB = 240 [188]. Prema [190], tvrdoća osnovnog materijala čelika klase S690 je između HB228 i HB 278.

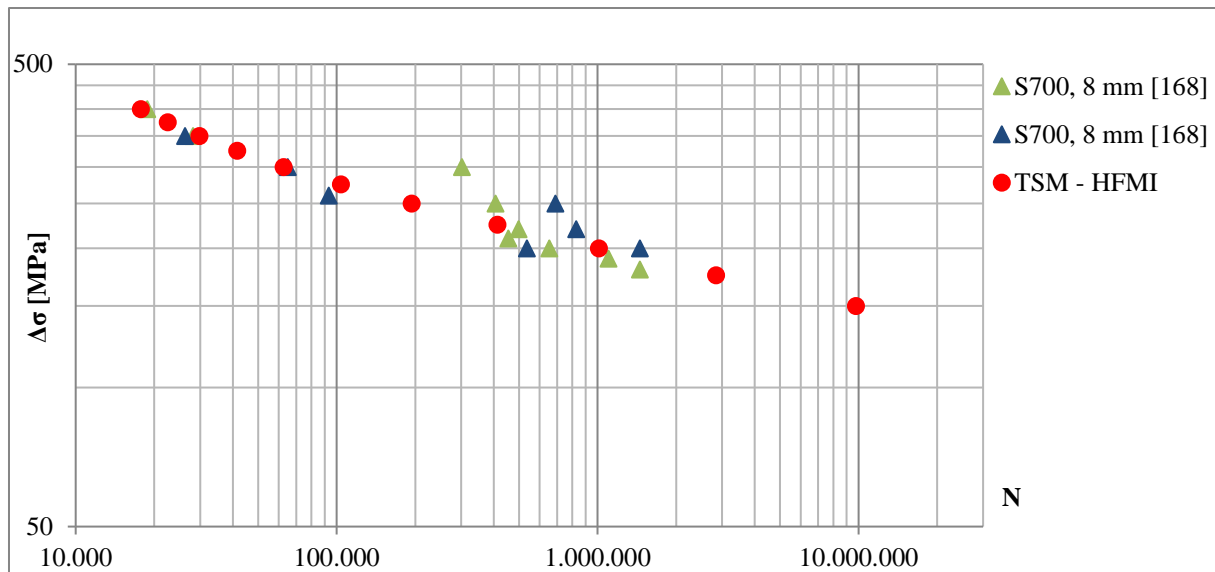
Prema [191], povećanje tvrdoće je najveće za čelike manje kvalitete, dok povećanje tvrdoće kod čelika visoke čvrstoće i nije tako značajno. Kako je prikazano u [89], za S960 se uočava neznatno povećanje tvrdoće u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala u iznosu od 435 HV0.05.

4.3.2.4 Rezultati proračuna TSM modela

U nastavku su prikazani rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora zavarenih LA detalja. Na temelju pregleda parametara u prošlom poglavlju, za potrebe proračuna se usvaja faktor koncentracije naprezanja u iznosu od $K_t = 3,27$ za AW stanje i $K_t = 2,05$ za HFMI obrađeno stanje. Zaostala naprezanja se usvajaju u iznosu od 340 MPa za AW stanje te 400 za HFMI obrađeno stanje. Vrijednost tvrdoće na površini ruba zavara se usvaja kao $HB = 230$, a za HFMI obrađeno stanje $HB = 240$. Omjer naprezanja se usvaja kao $R = 0,1$. TSM modelom se proračunava životni vijek AW i HFMI obrađenog detalja za različite razine razlika naprezanja, koji se potom vrednuju usporedbom s rezultatima cikličkih ispitivanja sličnih uzoraka. Rezultati su prikazani slikama 4.7 i 4.8.



Slika 4.7. Rezultati proračuna TSM modela za AW stanje – usporedba s ispitivanjima iz literature



Slika 4.8. Rezultati proračuna TSM modela za HFMI stanje – usporedba s ispitivanjima iz literature

Slike 4.7 i 4.8. prikazuju proračunate životne vjekove za različite vrijednosti razlika naprezanja. Prema TSM modelu, za pretpostavljene parametre poboljšanja za AW i HFMI obrađeno stanje, proračunati životni vjekovi pokazuju su sukladni rezultatima proračuna iz literature.

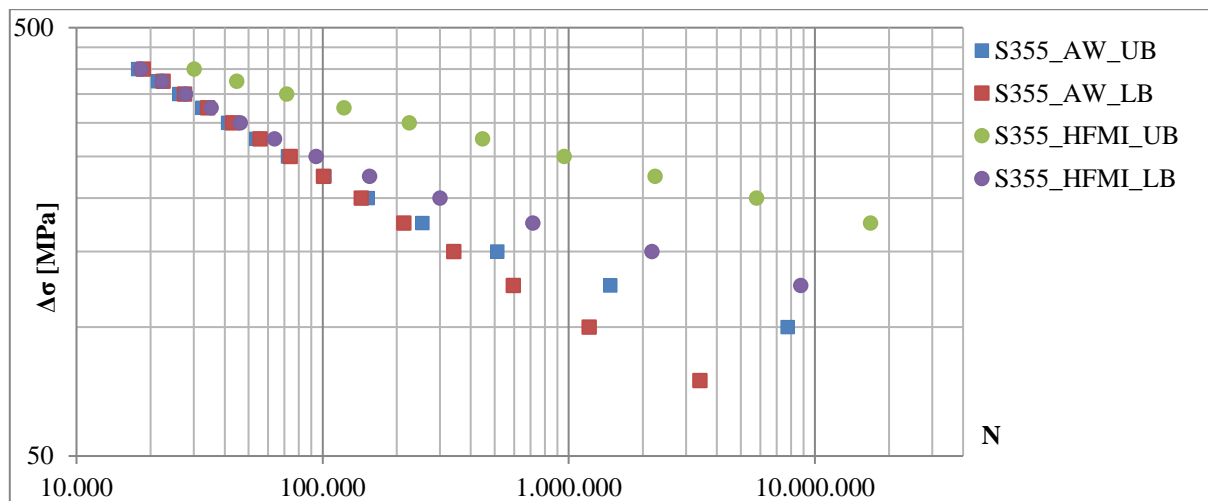
4.3.3 Parametarska analiza TSM modela

Kako bi se dobio uvid u utjecaj različitih kvaliteta čelika i HFMI parametara na životne vjekove zavarenih čeličnih LA detalja, provedena je parametarska analiza TSM modela. Za parametarsku analizu su odabrane tri kvalitete čelika: S355, S690 i S960. Kako je ranije spomenuto, u literaturi je prikazan široki raspon HFMI parametara poboljšanja za različite kvalitete čelika. Prema tome, za potrebe parametarske analize, usvojeni su najpovoljnije i najnepovoljnije kombinacije parametara poboljšanja za pripadajuće klase čelika (tablica 4.4). Primjerice, u slučaju kvalitete čelika S355 u AW stanju, najpovoljnija kombinacija rezultira minimalnim vrijednostima faktora koncentracije naprezanja i zaostalih naprezanja te maksimalnim vrijednostima tvrdoće. Analogno tome, najnepovoljnija kombinacija parametara rezultira maksimalnim vrijednostima faktora koncentracije naprezanja i zaostalih naprezanja te minimalnom vrijednosti tvrdoće. Ovakve kombinacije se usvajaju za AW i HFMI obrađeno stanje, što rezultira gornjom i donjom granicom proračunati životnih vjekova.

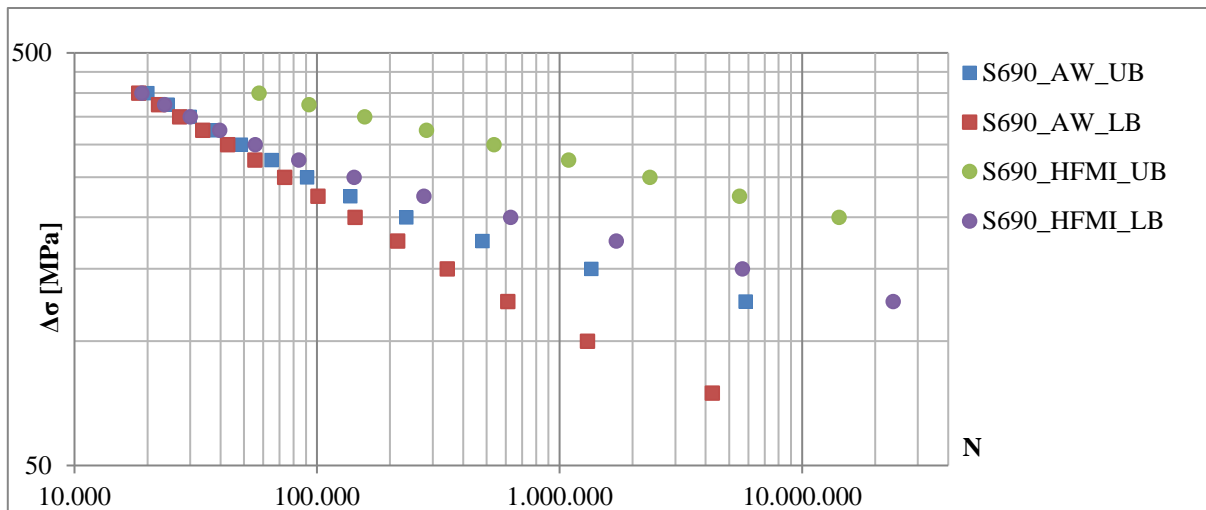
Tablica 4.4. Usvojeni parametri HFMI obrade za parametarsku analizu TSM modela

Klasa čelika		S355		S690		S960	
Parametar	Stanje	min	max	min	max	min	max
Koncentracija naprezanja	AW	2,6	4,0	2,6	4,0	2,6	4,0
	HFMI	1,8	2,2	1,8	2,2	1,8	2,2
Zaostala naprezanja (na površini) [MPa]	AW	25	250	25	400	25	600
	HFMI	-350	-200	-650	-400	-800	-600
Tvrdoća (na površini) [HB]	AW	146	187	230	240	320	320
	HFMI	240	290	240	270	320	340

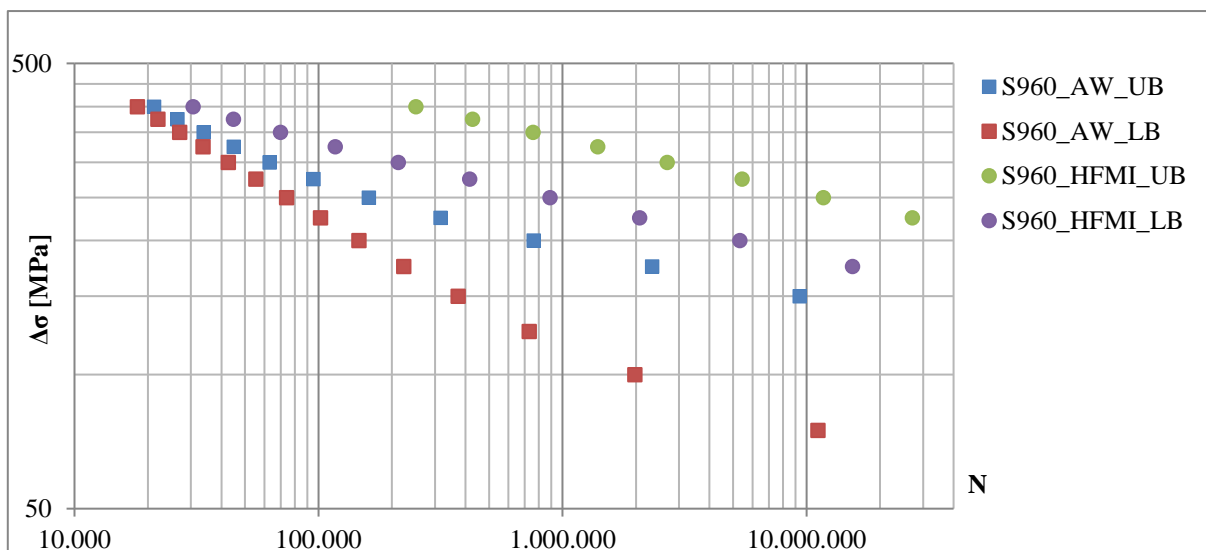
Rezultati parametarske analize su prikazani na slikama 4.9 – 4.11. Prikazani su intervali životnih vjekova kod umora prema TSM-u između najpovoljnijih (gornja granica – GG) i najnepovoljnijih (donja granica, DG) HFMI parametara poboljšanja za AW i HFMI obrađeno stanje. Rezultati su prikazani za različite kvalitete čelika kako bi se pokazao utjecaj kvalitete čelika za životni vijek zavarenog detalja izloženog umoru. AW i HFMI obrađeno stanje je prikazano na istom dijagramu kako bi se pokazalo povećanje životnoga vijeka kod umora HFMI obrađenih detalja.



Slika 4.9. Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S355 (AW i HFMI stanje)



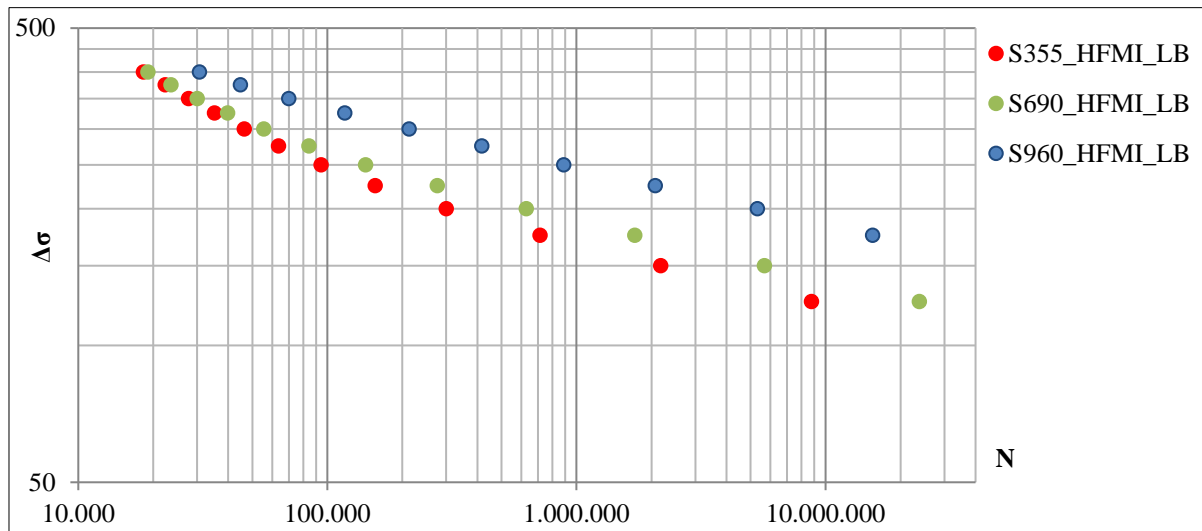
Slika 4.10. Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S690 (AW i HFMI stanje)



Slika 4.11. Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S690 (AW i HFMI stanje)

Rezultati prikazani slikama 4.9. – 4.11 pokazuju značajno povećanje životnoga vijeka HFMI obrađenih detalja u odnosu na AW detalje. HFMI metoda poboljšava geometriju ruba zavora i na taj način smanjuje vrijednost faktora koncentracije naprezanja, što osigurava dulji životni vijek detalja izloženog umoru. Kako je ranije spomenuto, HFMI metoda također modificira stanje zaostalih naprezanja na rubu zavora. HFMI metoda kod čelika visoke čvrstoće unosi veća tlačna naprezanja, što ima značajan utjecaj na povećanje životnoga vijeka kod umora. Pokazano je da HFMI obrađeni detalji izrađeni od čelika S960 (slika 4.11) imaju znatno veći životni vijek u odnosu na isti detalj izrađen od čelika S355 (slika 4.9). Kako bi se ovaj utjecaj jasnije pokazao, rezultati za donju granicu (DG) HFMI obrađenih detalja su prikazani na slici 4.12 za tri

promatrane kvalitete čelika. Vidljivo je da detalj izrađen od čelika S690 ima značajno veći životni vijek od čelika S355, ali i niži od detalja izrađenog od čelika S960.



Slika 4.12. Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S355, S690 i S960, LB)

Zbog plastičnih deformacija u području obrade, HFMI metoda uzrokuje povećanje lokalne tvrdoće na rubu zavora, što rezultira lokalno većom vlačnom čvrstoćom. U tablici 4.4 je vidljivo da HFMI metoda učinkovitije povećava tvrdoću kod čelika niže čvrstoće. Kod čelika S960, povećanje u tvrdoći je zanemarivo. Osim toga, na slici 4.12 je vidljivo da HFMI obrađeni detalji iste geometrije izrađeni od čelika S960 ima najdulji životni vijek kod umora, što pokazuje da za istu geometriju zaostala naprezanja imaju najveći utjecaj na životni vijek kod umora HFMI obrađenih zavarenih detalja.

4.3.4 Zaključak

TSM model je razvijen i primijenjen za proračun životnog vijeka LA detalja izloženog umoru za AW i HFMI obrađeno stanje. Rezultati TSM modela su potvrđeni ispitivanjima sličnih detalja iz literature gdje se pokazalo da se razvijenim TSM modelom može proračunati životni vijek kod umora sličnih detalja. Međutim, precizniji model mora u obzir uzeti sve geometrijske, materijalne i HFMI parametre poboljšanja što je moguće bliže stvarnosti. Dakle, za kalibraciju TSM modela, nužno je rezultate potvrditi vlastitim laboratorijskim ispitivanjima. Ispitivanja se trebaju provesti u poznatim uvjetima gdje se, uz preciznu geometriju i faktor koncentracije naprezanja, mjere i HFMI parametri poboljšanja na ispitnim uzorcima.

5 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

5.1 Opis eksperimentalnog programa

U nastavku je prikazana izrada uzoraka, planiranje i provedba laboratorijskih ispitivanja te rezultati ispitivanja s diskusijom i zaključcima. Laboratorijski uzorci izrađeni su od tradicionalnog konstrukcijskog čelika S355J2+N i čelika visoke čvrstoće S690QL u obliku zavarenih LA i TA detalja. Dio uzoraka je obrađen HFMI metodom prema uputama iz smjernica za provedbu HFMI obrade i kontrolu kvalitete [15]. Za dobivanje stvarnih mehaničkih karakteristika osnovnog materijala, provedeno je statičko vlačno ispitivanja. Za bolji uvid u promjenu tvrdoće materijala, na rubovima zavara (mjestima obrade) je prijenosnim tvrdomjerom izmjerena tvrdoća materijala prije i poslije HFMI obrade. Nadalje, na spomenutim lokacijama izmjerene su i vrijednosti zaostalih naprezanja prije i poslije obrade metodom Rendgenske difrakcije. Ciklička ispitivanja uzoraka izrađenih od S355J2+N pri konstantnim amplitudama provedena su na hidrauličkoj preši Zwick/Roell - Amsler HB250, dok su ispitivanja uzoraka izrađenih od S690QL provedena na dinamičkoj preši Instron 8802. Kako bi se pouzdano odredio kraj perioda nastanka pukotine i početak perioda širenja pukotine, prilikom ispitivanja na dinamičkoj preši, postavljena je digitalna kamera, koja je u određenim vremenskim intervalima automatski fotografirala rub zavara. Nakon ispitivanja, provedena je obrada fotografija na temelju čega je, uz dodatnu obradu pomaka čeljusti hidrauličke preše, utvrđen kraj tehničkog perioda nastanka pukotine. Prilikom planiranja eksperimenta u obzir su uzeta ograničenja laboratorija i dostupne opreme te potrebno vrijeme za ispitivanje uzoraka.

Eksperimentalno istraživanje se odnosi na izradu i eksperimentalno ispitivanje laboratorijskih uzoraka i obuhvaća:

- Izradu laboratorijskih uzoraka kao
- HFMI obradu zavara na dijelu izrađenih uzoraka
- 3D skeniranje uzoraka za dobivanje detaljne geometrije i kontrolu kvalitete
- Mjerenje tvrdoće materijala na mjestima HFMI obrade
- Mjerenje zaostalih naprezanja Rendgenskom difrakcijom na mjestima HFMI obrade
- Određivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala
- Ciklička ispitivanja uzoraka na hidrauličkoj preši (ispitivanja na umor)

Rezultati ispitivanja su analizirani te su na temelju istih izvedeni određeni zaključci. Također, uz ispitivanja iz literature, dobiveni rezultati se koriste kao ulazni podatci za precizniju kalibraciju determinističkoga, a potom i stohastičkoga modela za procjenu životnoga vijeka ovakvih detalja izloženih umoru.

5.2 Izrada ispitnih uzoraka

5.2.1 Materijal, rezanje ploča i zavarivanje ukrućenja

Uzorci za eksperimentalno ispitivanje izrađeni su prema EN 10204/2004/3.1 [192], od vruće valjanih normaliziranih ploča konstrukcijskog čelika S355J2+N i S690QL, nominalne debljine 8 mm. Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika prikazana je tablicama 5.1. i 5.2. Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika S355J2+N je preuzeta iz certifikata materijala, dok je u slučaju čelika S690QL nominalna kemijska struktura osnovnog materijala preuzeta iz norme EN 10025-6 [205].

Tablica 5.1. Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika S355J2+N

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V	Cu
Udio [%]	0,18	0,18	1,51	0,014	0,007	0,032	0,001	0,003	0,02
Element	Ni	Cr	Mo	Nb	B	H ₂	N ₂	Ca	CEV2
Udio [%]	0,01	0,02	0,002	0,004	0,0003	0,0005	0,0068	0,000	0,44

Tablica 5.2. Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika S690QL

Element	C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Cu	Mo
Udio [%]	0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	0,005	1,50	0,50	0,70
Element	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr	-	-	-
Udio [%]	0,015	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15	-	-	-

Kako bi se odredile stvarne mehaničke karakteristike osnovnog materijala izrađene su i epruvete za statičko vlačno ispitivanje materijala, što je opisano u kasnije u poglavlju. Rezanje i zavarivanje ploča klase čelika S355J2+N provedeno je u tvrtki Đuro Đaković Montaža d.o.o., a izrada uzoraka klase čelika S690QL u Laboratoriju za zavarivanje Strojarskog fakulteta u Zagrebu. Primjer rezanja ploče izrađene od čelika S690QL na komade dimenzija 560 mm x 90 mm prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Rezanje čelične ploče S690QL nominalne debljine 8 mm

Nakon rezanja ploče je slijedilo zavarivanje pločica (ukrućenja) u uzdužnom i poprečnom smjeru. Izrađeno je 11 komada LA detalja te 11 komada TA detalja od čelika S355J2+N te 12 komada LA detalja te 12 komada TA detalja od čelika S690QL. Zavarivanje je provedeno MAG (engl. Metal Active Gas) postupkom pri kojemu se materijal obradka tali u aktivnom zaštitnom plinu ili smjesi plinova taljivom elektrodom, koja je u obliku žice (slika 5.2). Zavarivanje MAG postupkom provedeno je u plinskoj smjesi prema EN ISO 14175: M21 (82%Ar + 18%CO₂) [194]. Tip zavarivanja je bio poluautomatski, tehnikom povlačenja.



Slika 5.2. Zavarivanje uzdužnog ukrućenja na ploču (LA detalj)

Zavarivanje ukrućenja provedeno je sukladno važećim normama i propisima, od strane atestiranih zavarivača. Uputa za zavarivanje (*engl. Welding Procedure Specification, WPS*) je izrađena prema normi EN ISO 15609 [195], a postupak zavarivanja prema EN ISO 4063 [196]. Uređaj kojim se provodilo zavarivanje je TransSteel 5000. Parametri zavarivanja uzdužnih i poprečnih ukrućenja su identični za detalje izrađene od S355J2+N i S690QL, a prikazani su tablicom 5.3. Kemijski sastav žice za zavarivanje VAC 60 prikazan je u tablici 5.4.

Tablica 5.3. Parametri zavarivanja uzdužnih i poprečnih ukrućenja (S355J2+N i S690QL)

Broj prolaza	Dodatni material	Promjer žice, mm	Struja zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Brzina dodavanja žice, m/min	Protok plina, l/min
1	VAC60	Ø1,2	240-260	28-31	7,9	15

Tablica 5.4. Kemijski sastav žice za zavarivanje (VAC 60)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
[%]	0,090	0,820	1,440	0,013	0,015	0,020	0,010	0,000	0,004
Element	V	Nb	Ti	Al	Sn	N	-	-	-
[%]	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	-	-	-

Nakon zavarivanja je provedena vizualna kontrola zavara te je utvrđeno da su zavari kvalitetno izvedeni. Primjer izrađenih uzoraka (kvalitete S690QL) je prikazan na slici 5.3.



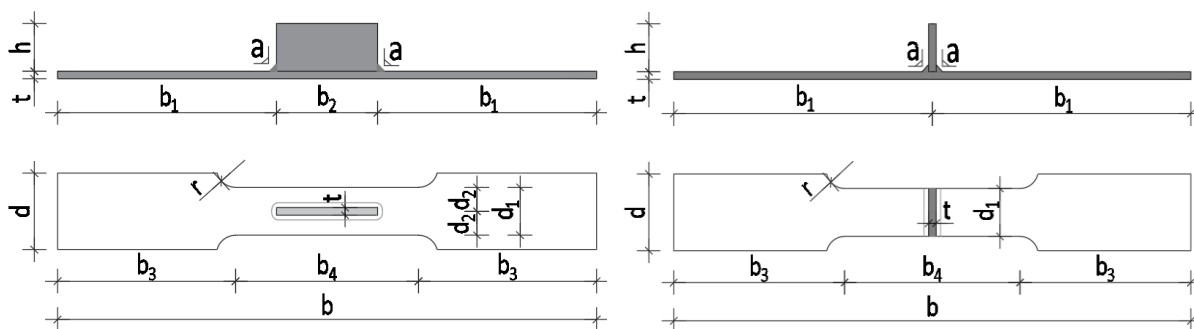
Slika 5.3. Zavarena uzdužna i poprečna ukrućenja na izrezane ploče S690QL

Iz serije izrađenih uzoraka su nasumično odabrana po dva uzorka za svaki tip detalja (LA i TA) te vrstu materijala (S355J2+N i S690QL), što je ukupno osam uzoraka. Po jedan uzorak iz svake skupine je obrađen HFMI metodom, što je opisano kasnije u poglavlju. Tako dobiveni uzorci

su odvojeni za mjerenje zaostalih napreznja, što je također opisano kasnije u ovom poglavlju. Svi ostali uzorci su podvrgnuti strojnoj obradi glodanjem kako bi se dobila geometrija pogodna za ciklička ispitivanja na dinamičkoj preši, što je opisano u nastavku.

5.2.2 Izrada ispitnih uzoraka glodanjem

Kako bi laboratorijski uzorci bili prikladni za cikličko ispitivanje na hidrauličkoj preši, provedena je strojna obrada uzoraka glodanjem. Konačna geometrija LA i TA detalja je prikazana na slici 5.4 i u tablici 5.5.



Slika 5.4. Geometrija ispitnih uzoraka, LA detalj (lijevo) i TA detalj (desno)

Tablica 5.5. Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka

	a	h	t	b	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	d	d ₁	d ₂	r
	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
LA	5,0	50,0	8,4	560,0	228,0	190,0	185,0	190,0	80,0	50,0	25,0	20
TA	5,0	50,0	8,4	560,0	280,0	-	185,0	190,0	80,0	50,0	-	20

Glodanje je postupak obrade metala odvajanjem čestica koji se izvodi se na alatnim strojevima (glodalicama), pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera. Os okretanja glavnog gibanja zadržava svoj položaj prema alatu bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja. Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala. Oštrice periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da im je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja. Istodobno je u zahvatu s obratkom samo nekoliko reznih oštrica. Glodanje uzoraka s poprečnim ukrućenjem prikazano je na slici 5.5.



Slika 5.5. Prikaz glodanja uzoraka – izrada uzoraka za laboratorijsko ispitivanje

Zavareni i izglodani laboratorijski uzorci prikazani su na slici 5.6. Dio uzoraka se u nastavku obrađuje HFMI metodom, što je opisano u idućem odlomku.



Slika 5.6. Izrađeni laboratorijski uzorci, LA detalj (lijevo) i TA detalj (desno)

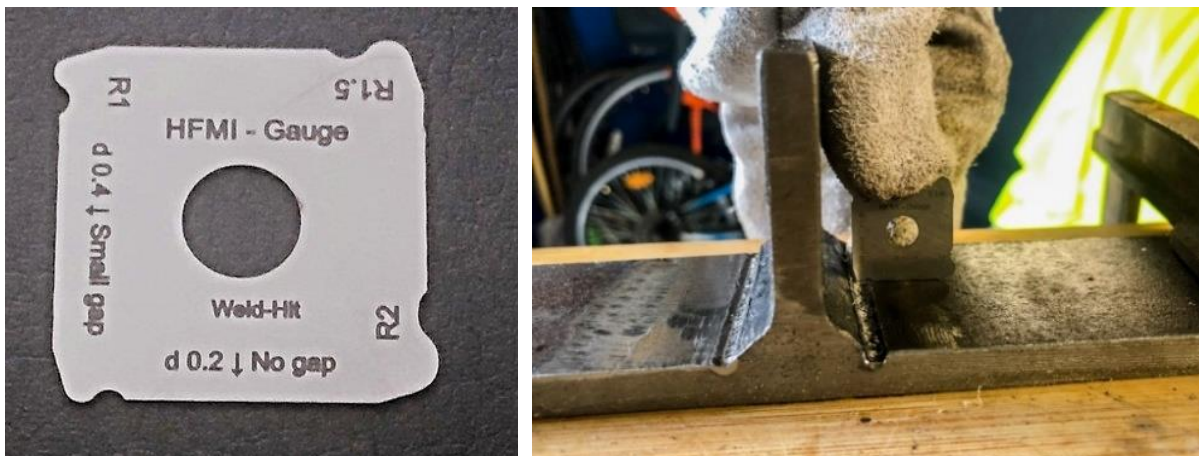
5.3 Obrada uzoraka HFMI metodom

HFMI metodom je obrađeno pet LA i pet TA detalja S355J2+N. U slučaju uzoraka izrađenih od čelika S690QL, obrađeno je sedam LA i pet TA detalja. HFMI obrada je provedena pomoću pneumatskog uređaja, gdje je izvor energije komprimirani zrak tlaka 6 bara. Uređaj radi pod frekvencijom od 100 Hz. Pri obradi je korištena okrugla glava radijusa 1,75 mm. HFMI obrada je provedena s minimalno 3 prolaza uređajem brzinom prema smjernicama za kontrolu kvalitete [15]. Prije same provedbe HFMI obrade, zavari su očišćeni od svih nečistoća i drugih stranih tijela. Slika 5.7. prikazuje AW i HFMI obrađeni TA detalj (S355J2+N).



Slika 5.7. AW (lijevo) i HFMI obrađeni (desno) TA detalj (S355J2+N)

Kako je prikazano na slici, obrađeni uzorak ima sjajni i kontinuirani žlijeb bez prekida koji je postignut pravilnom primjenom HFMI metode. Dubina žlijeba je najbolji pokazatelj pravilnog opsega HFMI tretmana, a kako bi se utvrdila optimalna dubina, u praksi se često koristi HFMI mjerac (engl. *HFMI gauge*), prikazan na slici 5.8.

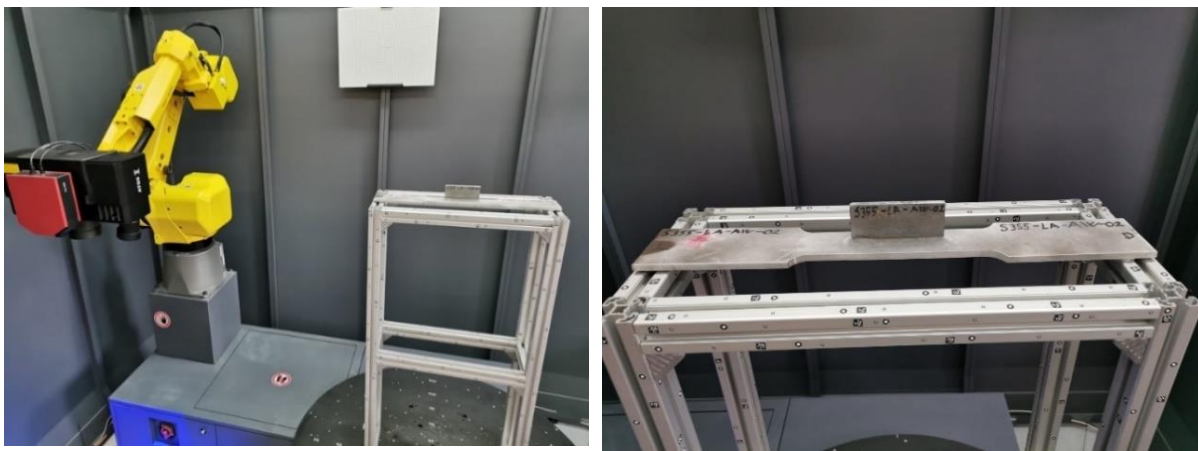


Slika 5.8. HFMI mjerac dubine žlijeba (lijevo) i mjerenje dubine žlijeba (desno)

5.4 Mjerenje geometrije – 3D skeniranje

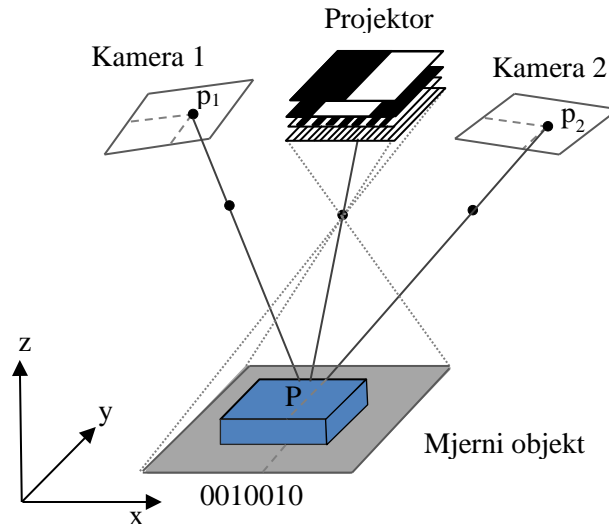
5.4.1 Uvod

Za precizno utvrđivanje geometrije AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja, provedeno je 3D skeniranje uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N. Skenirano je ukupno 12 uzoraka, odnosno tri AW i tri HFMI obrađena LA i TA detalja. Skeniranje je provedeno u tvrtki Topomatika d.o.o., a prilikom 3D skeniranja, korišten je skener GOM ATOS 5 montiranim na ScanBox mjernu ćeliju (slika 5.9) [197].



Slika 5.9. Mjerna postava (lijevo) i LA detalj na mjernoj postavi

Optički 3D skeneri imaju definirano trodimenzionalno mjerno područje u kojem digitalizator snima objekt. To se mjerno područje naziva mjerni volumen. Mjerni volumen se definira objektivima na kamerama i projektoru prema željenoj rezoluciji predmetnog modela. Ovakav skener koristi tehnologiju plavog svjetla, budući da plava svjetlost ima najkraću valnu duljinu te je vrlo malo zastupljena u okolišu. Prema [63] princip rada sustava je zasnovan na kombinaciji triangulacije i projiciranja rasterskog uzorka linija korištenjem nekoherentnog izvora svjetla (slika 5.10). Centralno postavljen projektor projicira unaprijed određenu rastersku strukturu na površinu mjernog objekta. To omogućuje jednoznačnu prostornu rekonstrukciju površine na temelju analize snimaka snimljenih s lijevom i desnom kamerom. Projektor služi kao pomoćno sredstvo za rješavanje problema jednoznačnosti, tj. prepoznavanja identičnih slikovnih osjeta objektne mjerne točke u svakoj od kamera (točke p_1 i p_2).

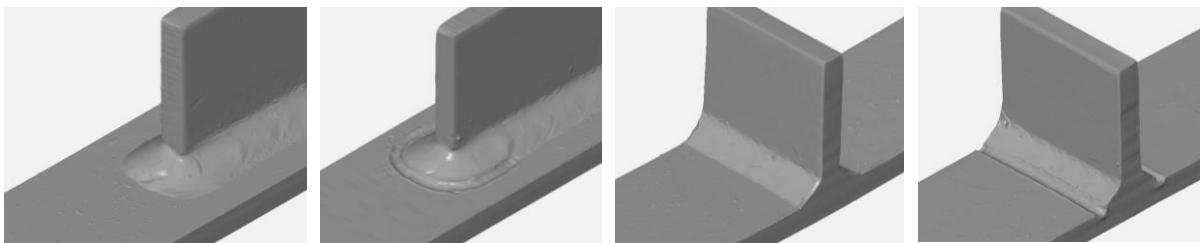


Slika 5.10. Princip projekcijskog senzora "Atos" [63]

Određivanje objektnih koordinata $P(X,Y,Z)$ općenito se provodi postupkom triangulacije, pri čemu jedan vrh zamišljenog trokuta čini odabrana objektna mjerna točka, a ostala dva vrha su položaji slikovnih osjeta objektna mjerne točke u svakoj od kamera. Više o samom principu rada i teorijskoj pozadini može se pronaći u [63]. 3D skeniranjem se dobiva precizna geometrija, koju je kasnijom obradom u CAD programskom paketu moguće precizno mjeriti.

5.4.2 Mjerenje geometrije i analiza podataka

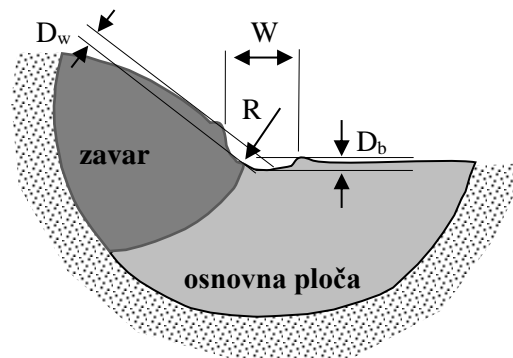
Provedbom 3D skeniranja dobiveni su 3D modeli na kojima je pomoću CAD alata moguće dobiti geometrijske parametre za kontrolu kvalitete HFMI obrade te preciznu geometriju za izradu numeričkih modela u sljedećoj fazi istraživanja. Primjeri dobivenih 3D modela LA i TA detalja prikazani su na slici 5.11.



Slika 5.11. Primjer dobivenih modela uzoraka 3D skeniranjem

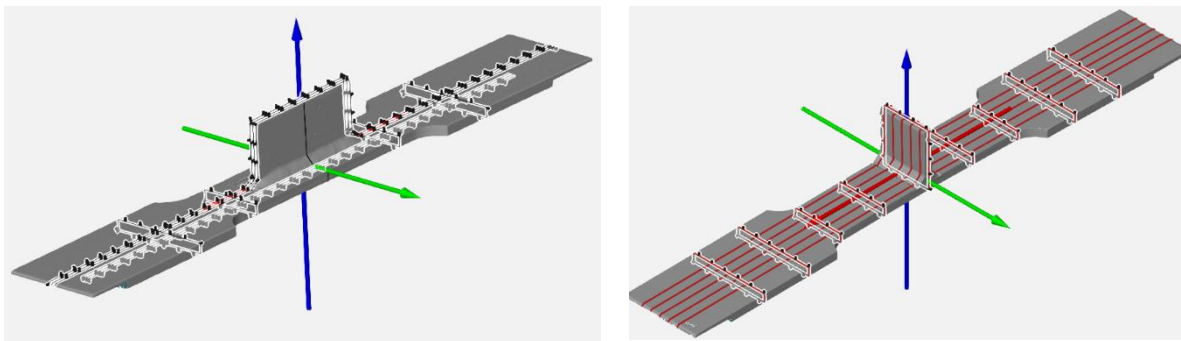
Geometrijski parametri HFMI obrađenih detalja (slika 5.12) su na dobivenim 3D modelima izmjereni pomoću CAD alata GOM Inspect Suite [198]. Parametri uključuju širinu HFMI

žlijeba (W), radijus HFMI žlijeba (R) i dvije dubine – udubljenja na strani zavara (D_w) i na strani osnovnog materijala (D_b).



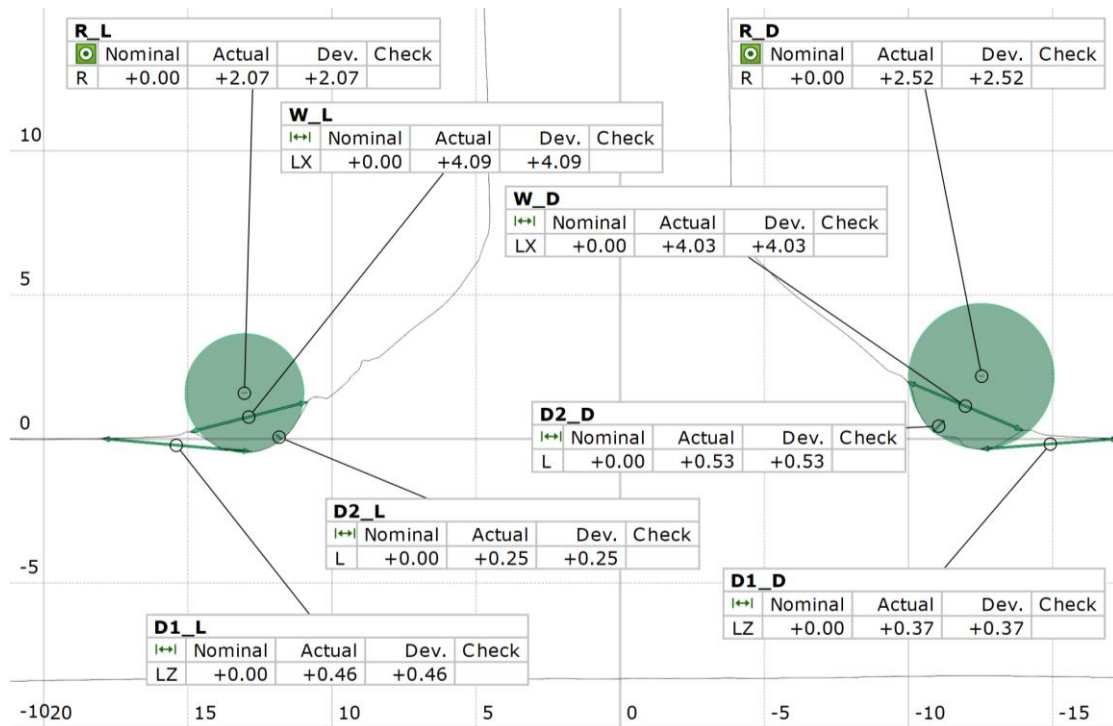
Slika 5.12. Geometrijski parametri mjereni na skeniranim modelima HFMI obrađenih uzoraka

Mjerenje je provedeno na uzdužnim i poprečnim presjecima kroz 3D modele koji su prikazani na slici 5.13, a izmjereno je ukupno tri uzdužna presjeka na razmacima od 12 mm kod TA detalja te tri uzdužna presjeka na razmacima od 3 mm kod LA detalja.



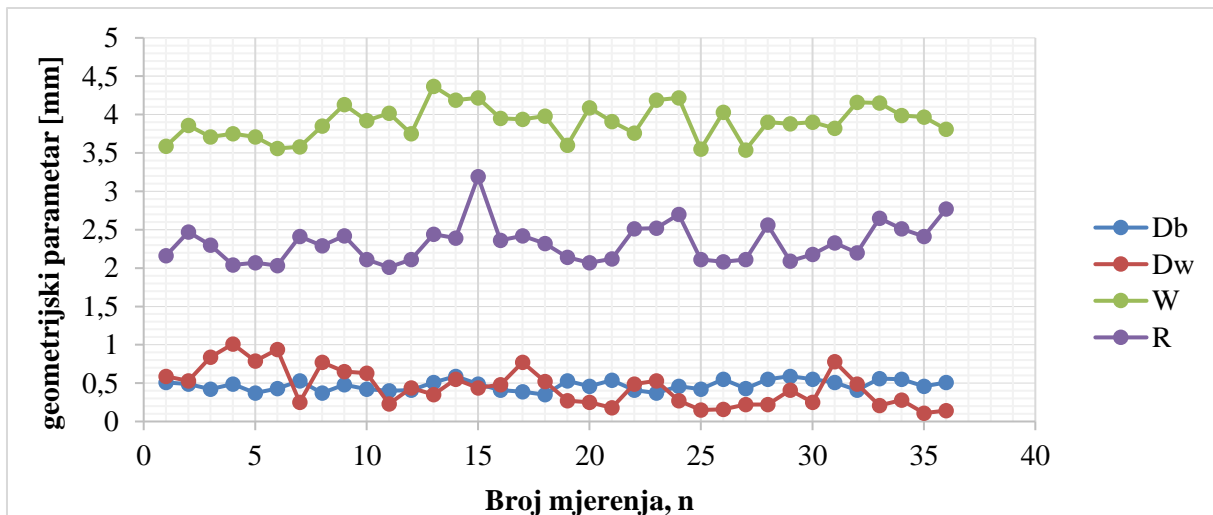
Slika 5.13. Prikaz uzdužnih i poprečnih presjeka u alatu GOM Inspect Suite

Geometrijski parametri su izmjereni za svaki uzdužni presjek. Slika 5.14. prikazuje primjer prikaza izmjerenih geometrijskih parametara u GOM Inspect-u za TA detalj, u uzdužnom presjeku, u ravnini „Y +0,00 mm“.



Slika 5.14. Primjer mjerenja geometrijskih parametara u GOM Inspect-u

Slika 5.15 prikazuje rezultate mjerenja, odnosno, dijagrame s pojedinim vrijednostima izmjerenih geometrijskih parametara u odnosu na broj mjerenja. Ukupno je provedeno 36 mjerenja svakog parametra. Rezultati mjerenja su također i tablično prikazani u Prilogu B.



Slika 5.15. Veličine izmjerenih geometrijskih parametara u odnosu na broj mjerenja

Izmjerene veličine su u skladu s preporukama za kontrolu kvalitete [15] te se ponovno potvrđuje da je HFMI obrada pravilno provedena. Maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti izmjerenih geometrijskih parametara dane su u tablici 5.6.

Tablica 5.6. *Srednje vrijednosti i standardne devijacije mjerenih geometrijskih parametara*

Geometrijski parametar	D_b	D_w	W	R
Maksimalna vrijednost	0,59	1,01	4,37	3,19
Minimalna vrijednost	0,35	0,11	3,54	2,01
Srednja vrijednost	0,470	0,450	3,904	2,322

Iz slike 5.15. i tablice 5.6 je vidljivo da je parametar D_b , koji se odnosi na dubinu utiskivanja materijala u odnosu na ravninu ploče uzorka (dubina žlijeba), najujednačeniji od svih veličina. Prema smjernicama, minimalna dubina žlijeba na rubu zavara mora biti 0,1 mm do 0,2 mm, a optimalna veličina ovisno o vrsti čelika iznosi od 0,2 mm do 0,6 mm u dubinu i 3,0 mm do 6,0 mm u širinu. Minimalna izmjerena dubina žlijeba na strani osnovne ploče HFMI obrađenih uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N iznosi 0,35 mm a srednja vrijednost iznosi 0,47 mm. Dubina žlijeba na strani osnovne ploče, D_b je zbog svoje ujednačenosti odličan je pokazatelj opsega HFMI tretmana.

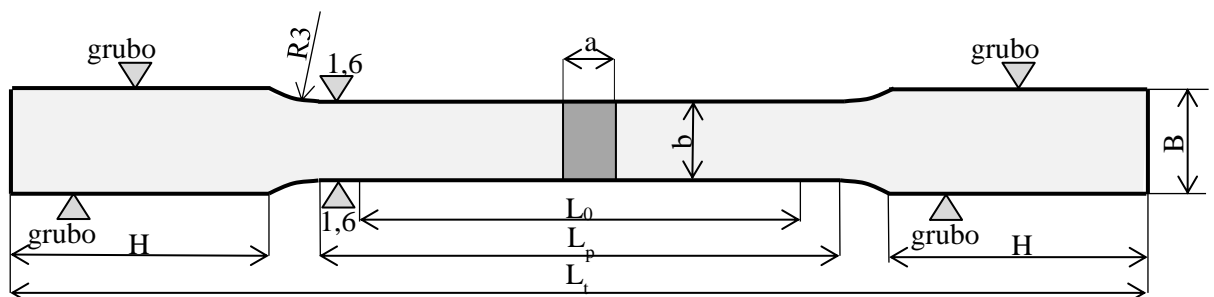
5.5 Ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala

Ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala S355J2+N i S690QL provedeno je u Laboratoriju za konstrukcije Instituta IGH d.d. vlačnim ispitivanjem pri sobnoj temperaturi. Metoda ispitivanja je prema normi HRN EN ISO 6892-1, metoda B [199]. Svi uzorci ispitani su na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje (slika 5.16). Brzina ispitivanja je iznosila 0,0025-0,008 1/s. Mjerenje deformacija je provedeno pomoću ekstenzometra do maksimalne sile, nakon čega su mjerenja deformacije provedena samo na statičkom uređaju za ispitivanje. Pri tome je ispitivanje upravljano pomoću programskog alata TestExpert [200].



Slika 5.16. Vlačno ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala

Ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala provedeno je na ispitnim uzorcima prikazanim na slici 5.17. Dimenzije epruveta su prikazane u tablici 5.6.



Slika 5.17. Nacrt epruvete za vlačno ispitivanje materijala

Tablica 5.7. Dimenzije epruveta za vlačno ispitivanje

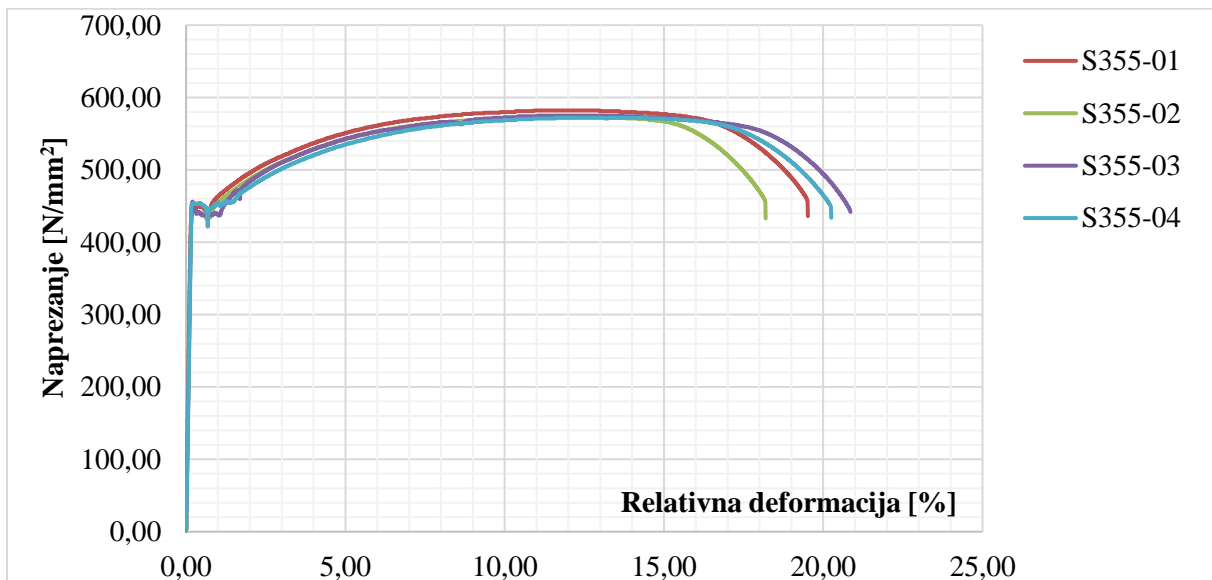
Debljina a [mm]	Širina b [mm]	L_0 [mm]	L_p [mm]	L_t [mm]	B [mm]	H [mm]
8	20 ±0,1	100	120	300	26	80

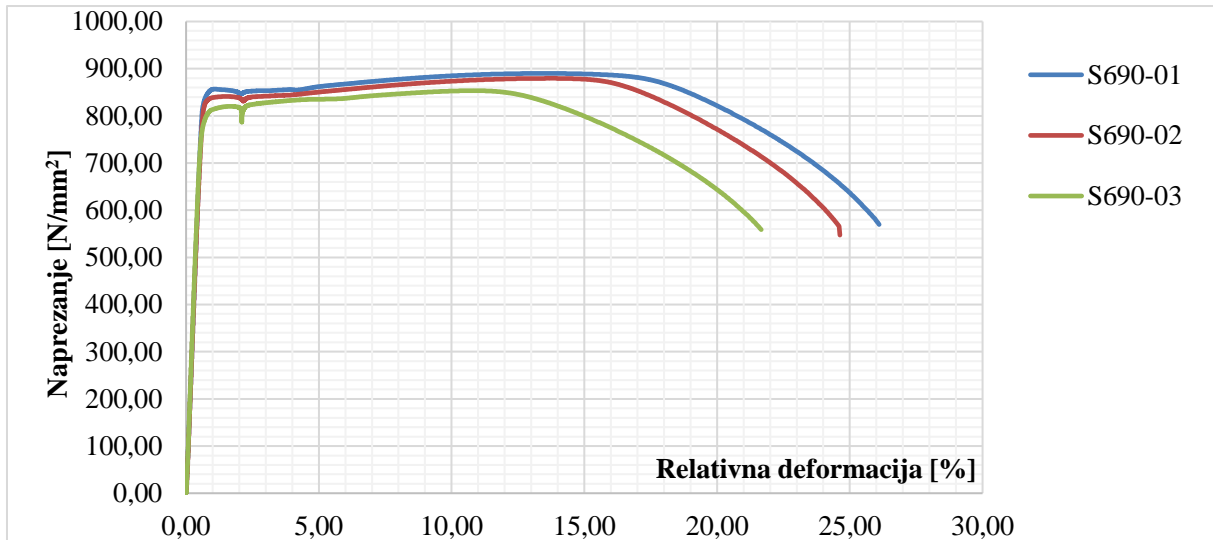
U tablicama 5.7. i 5.8. prikazani su rezultati ispitivanja provedenih vlačnih ispitivanja epruveta izrađenih od čelika S355J2+N te S690QL, a slike 5.18. i 5.19 prikazuje radne dijagrame ispitnih epruveta.

Tablica 5.8. Rezultati vlačnog ispitivanja čelika S355J2+N i S690QL

Uzorak	t [mm]	b [mm]	S [mm ²]	R_{eH} (f_y) [N/mm ²]	R_m (f_u) [N/mm ²]	ϵ_{max} [%]
S355-01	8,3	20,1	166,8	449	582	19,52
S355-02	8,3	19,9	165,2	442	573	18,19
S355-03	8,3	20,1	166,8	456	575	20,85
S355-04	8,3	20,0	166,0	454	572	20,25
S690QL-01	7,9	20,1	158,8	846	883	26,1
S690QL-02	7,9	20,0	158,0	825	868	24,6
S690QL-03	7,9	20,1	158,8	803	851	21,7

Mjerna nesigurnost: za R_{eH} R_m $U=+-2,4\%$, $k=2$, $A_{5,65}$ $U=+-1,2\%$, $k=2$

**Slika 5.18.** Radni dijagrami ispitnih uzoraka S355J2+N



Slika 5.19. Radni dijagrami ispitnih uzoraka S690QL

Statistički parametri granice popuštanja, f_y i vlačne čvrstoće, f_u , za čelik kvalitete S355J2+N i S690QL prikazani su tablicom 5.9. Usvaja se normalna funkcija raspodjele podataka.

Tablica 5.9. Statistički parametri rezultata vlačnog ispitivanja uzoraka

Parametar	$f_{y,S355}$	$f_{u,S355}$	$f_{y,S690}$	$f_{u,S690}$
σ	450,3	575,5	824,7	867,3
μ	5,4	3,9	17,6	13,1

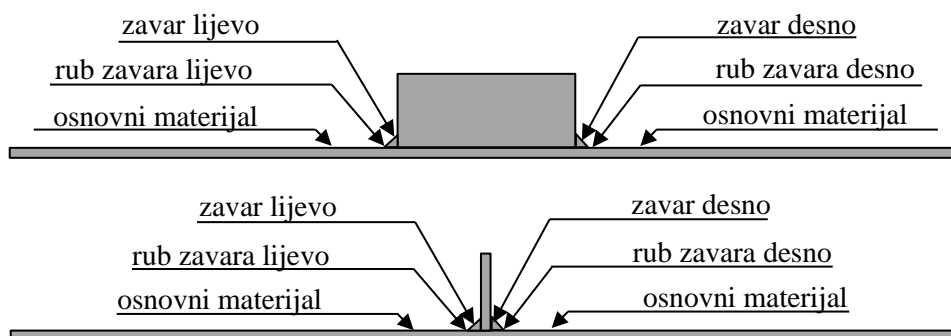
5.6 Mjerenje tvrdoće materijala

U nastavku je opisana procedura mjerenja tvrdoće materijala na pojedinim mjestima te su prikazani rezultati s diskusijom. Mjerenje je provedeno prijenosnim tvrdomjerom koji radi na principu penetracije Vickers-ove dijamantne piramide (kut 136°) s procjenom udubljenja pomoću metode Ultrazvučnog kontaktnog otpora (*engl. Ultrasonic Contact Impedance*). Na ovaj način je moguće jednostavno i brzo mjeriti tvrdoću na površini materijala. Vickers-ova dijamantna piramida se utiskuje u površinu materijala i na zaslonu se prikazuje iznos tvrdoće. Sve vrijednosti tvrdoće prikazuju se u Brinell-ovoj ljestvici (HB). Mjerni uređaj i mjerenje tvrdoće na površini materijala prikazani su na slici 5.20.



Slika 5.20. Uređaj za mjerenje tvrdoće (lijevo) i mjerenje tvrdoće na uzorcima (desno)

Cilj mjerenja tvrdoće je bio dobiti informaciju o vrijednosti tvrdoće kao HFMI parametra poboljšanja na rubu zavora AW i HFMI obrađenih uzoraka. Tvrdoća se mjeri na mjernim mjestima prikazanim na slici 5.21, a za svako mjerno mjesto se provodi 12 ispitivanja, kako bi se mogle dobiti i vrijednosti za deterministički model te statističke veličine bazne varijable tvrdoće za stohastički model.



Slika 5.21. Mjerna mjesta tvrdoće na uzorcima

Ukupno je provedeno 1008 mjerenja tvrdoće na rubu zavara s lijeve i desne strane, kako je prikazano na slici 5.21. Vrijednost tvrdoće je izrazito lokalnog karaktera i ne ovisi o tipu detalja pa su prikazani rezultati mjerenja objedinjeni i za LA i TA detalje. Dobiveni rezultati slijede Gauss-ovu raspodjelu, a ukupni broj mjerenja za pojedinu kvalitetu čelika (S355J2+N i S690QL) i stanje obrade (AW ili HFMI) te proračunati statistički parametri (srednja vrijednost, μ i standardna devijacija, σ) su prikazani u tablici 5.10.

Tablica 5.10. Rezultati mjerenja tvrdoće na rubu zavara LA i TA detalja

	S355-AW	S355-HFMI	S690-AW	S690-HFMI
n =	240	288	240	240
σ =	161	222	202	325
μ =	18,27	34,56	22,65	61,83

Rezultati ukazuju na značajno lokalno povećanje tvrdoće nakon primjene HFMI metode. Iz tablice 5.10 se uočava povećanje tvrdoće na mjestu HFMI obrade od oko 38% za detalje izrađene od čelika S355J2+N te oko 61% za detalje izrađene od čelika S690QL. Kod čelika kvalitete S690QL uočava se veće raspršenje podataka. Također je provedeno i 1007 mjerenja tvrdoće zavara te 504 mjerenja tvrdoće osnovnog materijala na promatranim detaljima. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 5.11.

Tablica 5.11. Rezultati mjerenja tvrdoće zavara i osnovnog materijala

	S355 (osnovni materijal)	S690 (osnovni materijal)	S355 (zavar)	S690 (zavar)
n =	264	240	528	479
σ =	153,1	209,8	151,7	172,2
μ =	7,8	21,4	15,7	19,2

Čelik kvalitete S690QL ima oko 37% veću tvrdoću osnovnog materijala od čelika S355J2+N, dok je razlika u izmjerenim tvrdoćama zavara oko 10%, pri čemu veću tvrdoću također imaju zavari kod detalja izrađenih od materijala S690QL.

5.7 Mjerenje zaostalih naprezanja

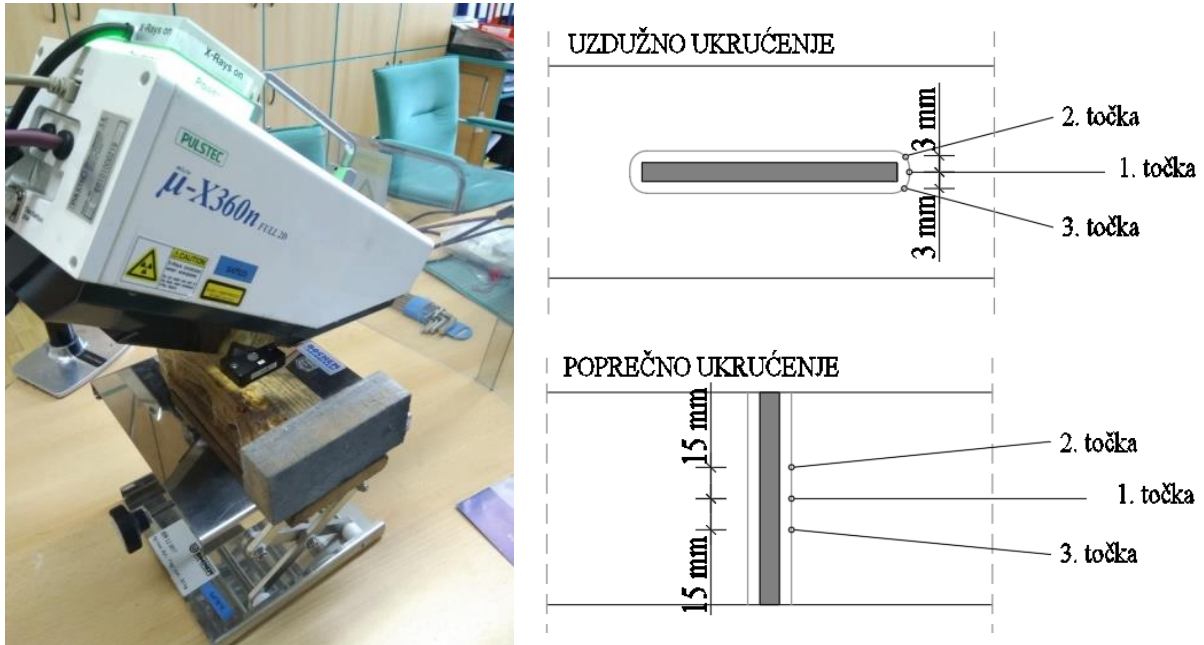
U nastavku je opisano laboratorijsko mjerenje zaostalih naprezanja na rubu zavora AW i HFMI obrađenih uzoraka te su prikazani rezultati mjerenja s diskusijom. Mjerenje je provedeno na u Laboratoriju za konstrukcije na Strojarskom fakultetu u Mariboru metodom Rendgenske difrakcije. Prednost navedene metode je u tome što ne postoje ograničenja u veličini mjernog uzorka, a također je moguće precizno mjeriti zaostala naprezanja i kod uzoraka s kompleksnom geometrijom. Nedostatak metode je niska dubina penetracije rendgenskih zraka, osobito u slučajevima kada je potrebno izmjeriti zaostala naprezanja kroz dubinu ploče. HFMI metoda mijenja stanje zaostalih naprezanja pri površini materijala, a pukotina nastala umorom nastaje na površini materijala tako da ovaj nedostatak nije relevantan u ovom slučaju. Kako je ranije spomenuto, uzorci predviđeni za mjerenje zaostalih naprezanja su nakon zavarivanja nasumično odabrani te se od takvih uzoraka nisu izrađivali uzorci za ciklička ispitivanja. Dio uzoraka je obrađen HFMI metodom. Odabran je po jedan uzorak iz svake skupine (LA i TA), za svako stanje obrade (AW i HFMI obrađeno) i svaki materijal (S355J2+N i S690QL), što je ukupno osam uzoraka, kako je prikazano na slici 5.22. Za AW uzorke mjerenja su provedena što je moguće bliže rubu zavora. Za HFMI tretirane uzorke, mjerenja su provedena na dnu HFMI žlijeba.



Slika 5.22. Uzorci za mjerenja zaostalih naprezanja

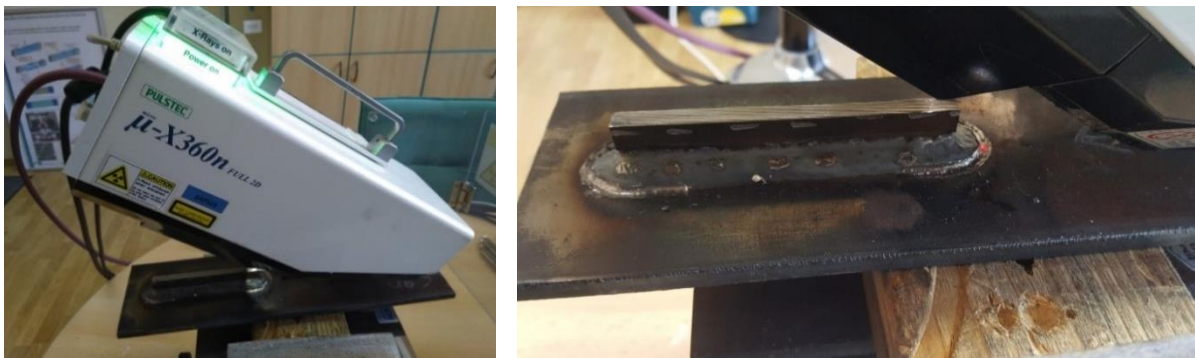
Zaostala naprezanja su izmjerena pomoću uređaja Pulstec μ -360 pomoću $\cos(\alpha)$ metode, koristeći snop X-zraka za ozračivanje površine do dubine od 10 μm . Na temelju refleksije u kristalografskim ravninama, detektor očitava ukupne devijacije u svim smjerovima. Na temelju

usporedbe s idealnom kristalnom rešetkom, prosječna vrijednost devijacije u pojedinom smjeru označava vrijednost zaostalog naprezanja. Slika 5.23 (lijevo) prikazuje mjerni uređaj, a slika 5.23 (desno) položaj točaka u kojima se mjere zaostala naprezanja.

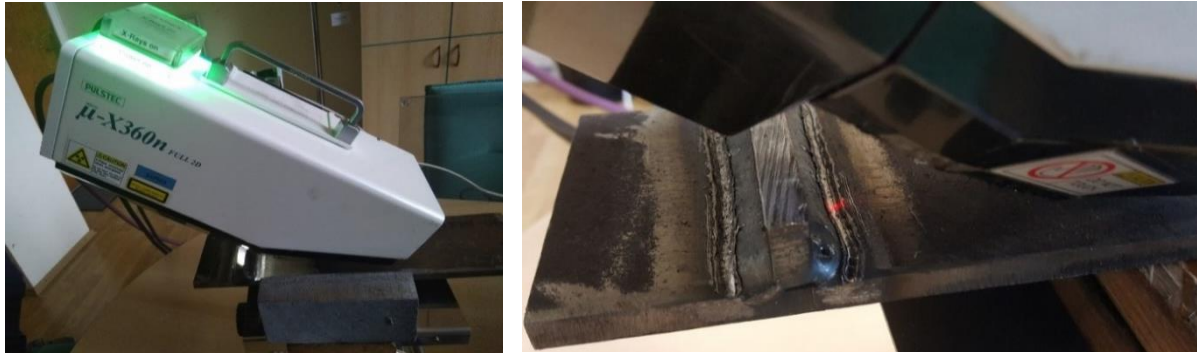


Slika 5.23. Mjerni instrument (lijevo) i položaj mjernih točaka na detaljima (desno)

Slika 5.24 prikazuje mjerenje zaostalih naprezanja na zavarenom HFMI obrađenom LA detalju, a slika 5.25 mjerenje zaostalih naprezanja na zavarenom HFMI obrađenom TA detalju. Na slikama je vidljivo da je dio ukrućenja odrezan zbog povoljnijeg pristupa mjernog uređaja, što ne utječe na stanje zaostalih naprezanja na rubu zavora.



Slika 5.24. Mjerenje zaostalih naprezanja na rubu zavora HFMI obrađenog LA detalja



Slika 5.25. Mjerenje zaostalih naprezanja na rubu zavora HFMI obrađenog TA detalja

Tablica 5.12 prikazuje rezultate mjerenja, odnosno, statističke parametre izmjerenih vrijednosti normalnih naprezanja (σ_x) kod uzoraka sa zavarenim LA detaljima. Tablica 5.13 prikazuje statističke parametre izmjerenih vrijednosti posmičnih naprezanja, τ_{xy} kod uzoraka sa zavarenim LA detaljima. Prikazane su srednje vrijednosti normalnih i posmičnih naprezanja (σ_{σ_x} i $\sigma_{\tau_{xy}}$) te standardne devijacije istih (μ_{σ_x} i $\mu_{\tau_{xy}}$).

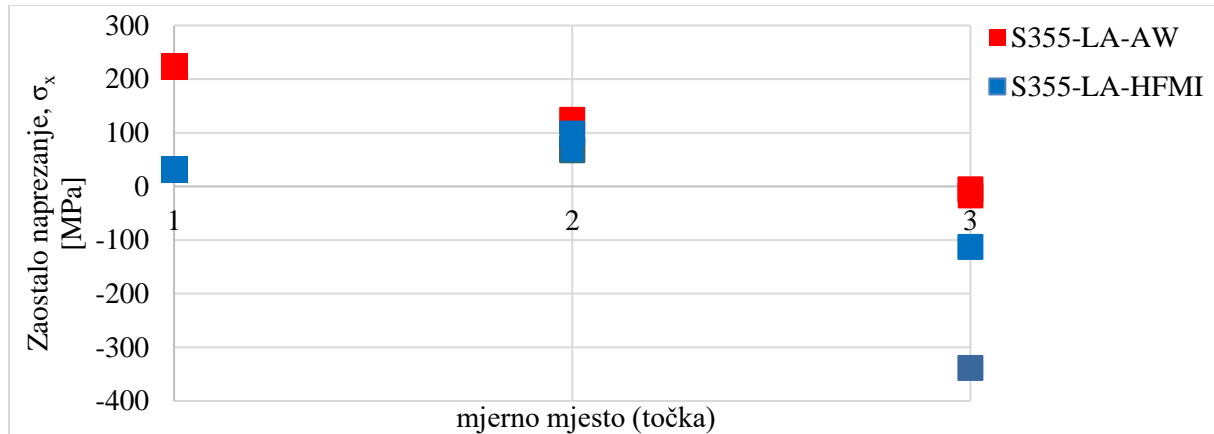
Tablica 5.12. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod LA detalja

Uzorak	Br.	1. točka		2. točka		3. točka	
		σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]	σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]	σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]
S355-LA-AW	1.	224,0	8,0	124,0	63,0	-17,0	16,0
	2.	226,0	8,0	69,0	51,0	-6,0	18,0
S355-LA-HFMI	1.	30,0	11,0	67,0	9,0	-339,0	19,0
	2.	31,0	14,0	98,0	12,0	-113,0	14,0
S690-LA-AW	1.	-195,0	58,0	-88,0	35,0	192,0	17,0
	2.	-55,0	47,0	-25,0	31,0	173,0	44,0
S690-LA-HFMI	1.	-377,0	N/A	-437,0	19,0	48,0	9,0
	2.	-235,0	23,0	-441,0	15,0	12,0	16,0

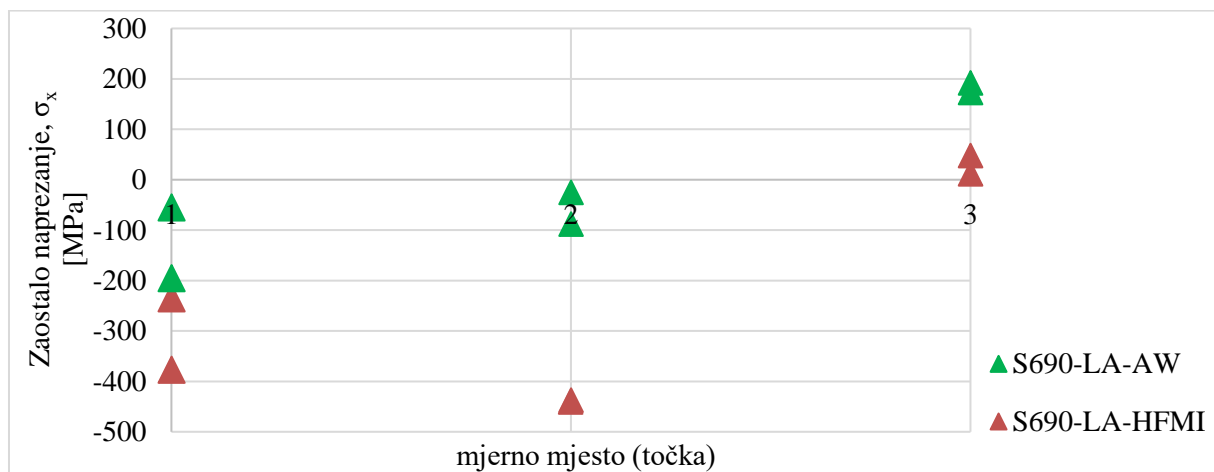
Tablica 5.13. Rezultati mjerenja posmičnih zaostalih naprezanja (τ_{xy}) kod LA detalja

Uzorak	Br.	1. točka		2. točka		3. točka	
		$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]
S355-LA-AW	1.	-39,0	8,0	47,0	54,0	-24,0	7,0
	2.	-39,0	9,0	84,0	46,0	-46,0	12,0
S355-LA-HFMI	1.	-110,0	6,0	61,0	12,0	-332,0	13,0
	2.	-104,0	10,0	-15,0	6,0	-269,0	20,0
S690-LA-AW	1.	16,0	24,0	-43,0	24,0	105,0	40,0
	2.	97,0	48,0	13,0	45,0	25,0	80,0
S690-LA-HFMI	1.	-242,0	N/A	-252,0	13,0	19,0	14,0
	2.	-21,0	23,0	-153,0	16,0	39,0	16,0

Slika 5.26 grafički prikazuje rezultate mjerenja normalnih zaostalih naprezanja, σ_x , kod uzoraka sa zavarenim LA detaljima kvalitete čelika S355J2+N, a slika 5.27 grafički prikazuje rezultate mjerenja normalnih zaostalih naprezanja, σ_x , kod uzoraka sa zavarenim LA detaljima kvalitete čelika S690QL.



Slika 5.26. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S355J2+N)



Slika 5.27. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S690QL)

Tablica 5.14 prikazuje rezultate mjerenja, odnosno, statističke parametre izmjerenih vrijednosti normalnih naprezanja (σ_x) kod uzoraka sa zavarenim TA detaljima. Tablica 5.15 prikazuje statističke parametre izmjerenih vrijednosti posmičnih naprezanja (τ_{xy}) kod uzoraka sa zavarenim TA detaljima. Prikazane su srednje vrijednosti normalnih i posmičnih naprezanja (σ_{σ_x} i $\sigma_{\tau_{xy}}$) te standardne devijacije istih (μ_{σ_x} i $\mu_{\tau_{xy}}$).

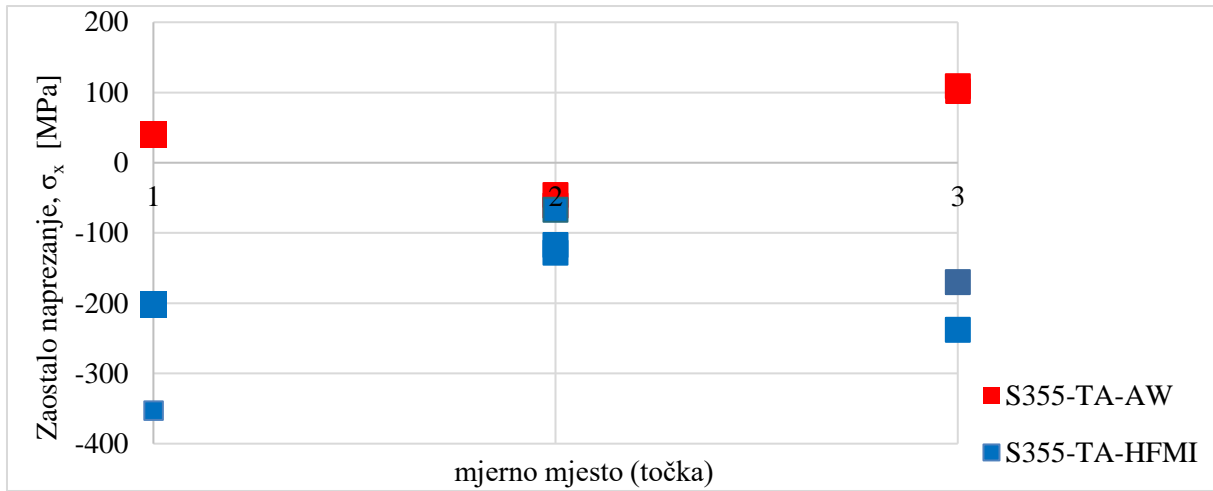
Tablica 5.14. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod TA detalja

Uzorak	Br.	1. točka		2. točka		3. točka	
		σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]	σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]	σ_{σ_x} [MPa]	μ_{σ_x} [MPa]
S355-TA-AW	1.	40,0	3,0	-61,0	21,0	102,0	29,0
	2.	50,0	21,0	-46,0	26,0	109,0	41,0
S355-TA-HFMI	1.	-353,0	39,0	-67,0	15,0	-170,0	35,0
	2.	-202,0	34,0	-128,0	28,0	-238,0	21,0
	3.	/	/	-117,0	15,0	/	/
S690-TA-AW	1.	140,0	17,0	-141,0	39,0	5,0	55,0
	2.	-285,0	49,0	15,0	39,0	-74,0	48,0
	3.	/	/	-86,0	20,0	-144,0	42,0
S690-TA-HFMI	1.	11,0	9,0	-186,0	15,0	-102,0	15,0
	2.	-133,0	35,0	-139,0	8,0	-202,0	13,0
	3.	-125,0	43,0	/	/	-205,0	12,0

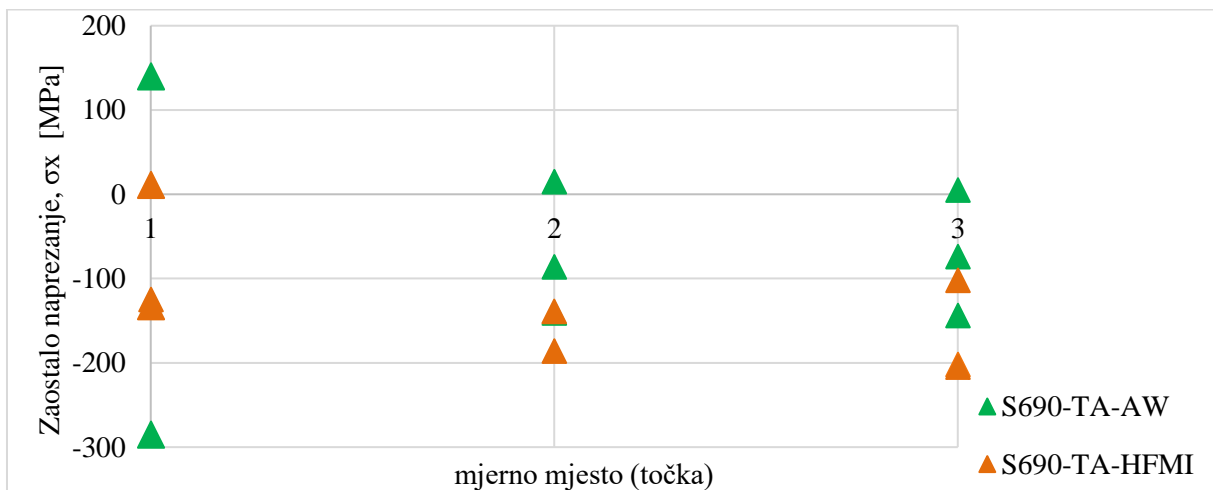
Tablica 5.15. Rezultati mjerenja posmičnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod TA detalja

Uzorak	Br.	1. točka		2. točka		3. točka	
		$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\sigma_{\tau_{xy}}$ [MPa]	$\mu_{\tau_{xy}}$ [MPa]
S355-TA-AW	1.	-85,0	5,0	-25,0	42,0	49,0	49,0
	2.	-33,0	22,0	10,0	32,0	43,0	33,0
S355-TA-HFMI	1.	155,0	18,0	55,0	7,0	222,0	8,0
	2.	9,0	21,0	121,0	18,0	20,0	15,0
	3.	/	/	99,0	8,0	/	/
S690-TA-AW	1.	34,0	30,0	-45,0	14,0	-59,0	53,0
	2.	23,0	25,0	-23,0	40,0	42,0	57,0
	3.	/	/	-55,0	29,0	-6,0	62,0
S690-TA-HFMI	1.	75,0	7,0	23,0	10,0	-1,0	22,0
	2.	-15,0	28,0	-8,0	10,0	33,0	16,0
	3.	-94,0	36,0	/	/	38,0	13,0

Slika 5.28 grafički prikazuje rezultate mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod uzoraka sa zavarenim TA detaljima kvalitete čelika S355J2+N, a slika 5.29 grafički prikazuje rezultate mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod uzoraka sa zavarenim TA detaljima kvalitete čelika S690QL.



Slika 5.28. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih TA detalja (S355J2+N)



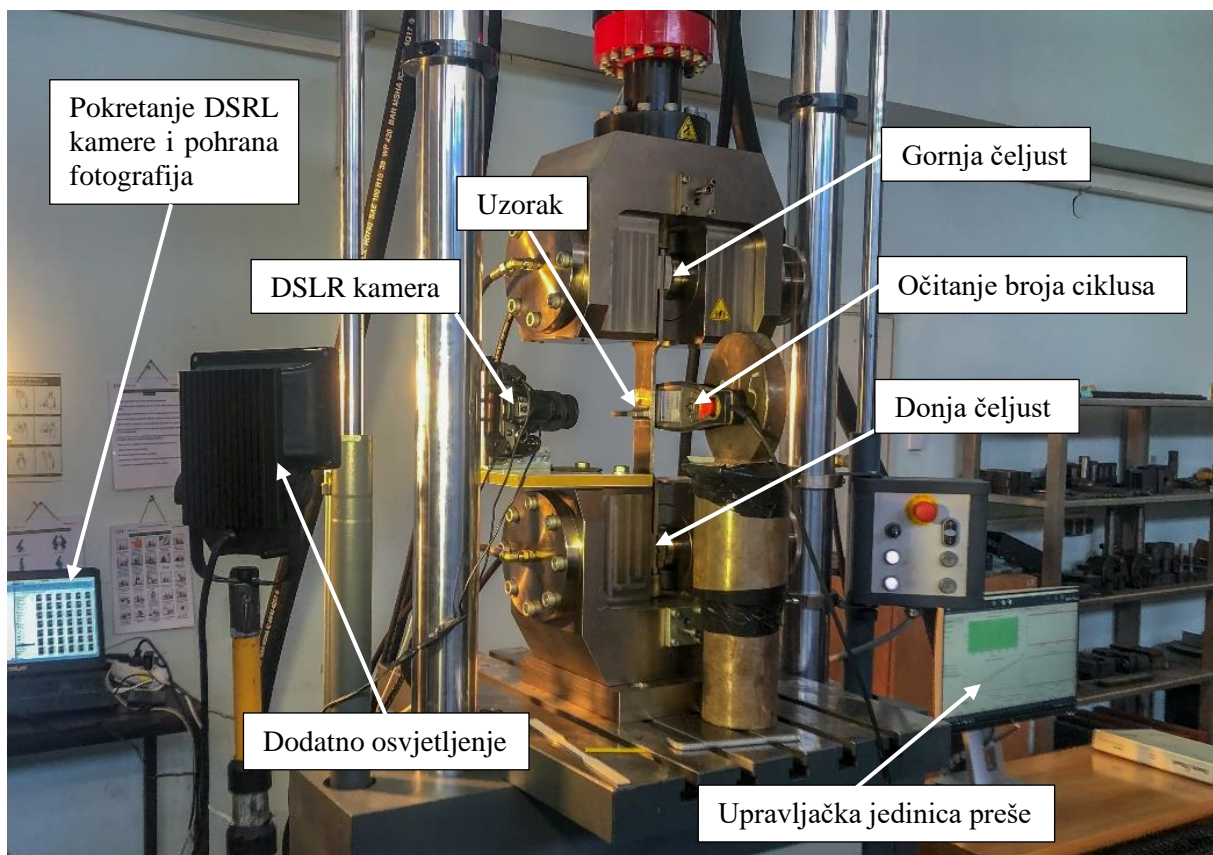
Slika 5.29. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S690QL)

Rezultati pokazuju da su vrijednosti zaostalih naprezanja u području HFMI obrade znatno niže u odnosu na AW rubove zavora, što upućuje na značajan unos zaostalih naprezanja HFMI obradom. Smanjenje zaostalih naprezanja uočava se i kod ploča izrađenih od čelika kvalitete S355J2+N i kod ploča izrađenih od čelika kvalitete S690QL. Kod uzoraka S355J2+N su na pojedinim mjestima izmjerena visoka vlačna zaostala naprezanja, koja su nakon HFMI obrade bitno smanjila i čak postala i negativna. Kod detalja izrađenih od S690QL, koji imaju višu granicu popuštanja i vlačnu čvrstoću, izraženija su negativna zaostala naprezanja. Rezultati potvrđuju da su tlačna zaostala naprezanja unesena HFMI obradom viša kod čelika više čvrstoće, što povoljno utječe na životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru izrađenih od čelika visoke čvrstoće.

5.8 Cikličko ispitivanje uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N

5.8.1 Uvod i plan ispitivanja

Cikličko ispitivanje (ispitivanje uzoraka na umor) uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N je provedeno u Laboratoriju za konstrukcije Instituta IGH d.d., na hidrauličkoj preši Zwick/Roell - Amsler HB250, pri cikličkim naprezanjima konstantnih amplituda. Mjerna postava je prikazana na slici 5.30.



Slika 5.30. Mjerna postava za cikličko ispitivanje uzoraka

Ispitivanja su se provodila sve do loma uzoraka, odnosno sve dok ciklična naprezanja određene konstantne amplitude nisu uzrokovala otkazivanje elementa. Za uzorke koji nisu doživjeli lom, a cikličko opterećenje je doseglo minimalno $N = 4 \cdot 10^6$ broja ciklusa, smatrano je da nisu otkazali i podatak je zabilježen kao „runout“. „Runout“ je po definiciji uzorak koji nije otkazao u razumnom vremenu u odnosu na ostale uzorke koji su otkazali pri istim uvjetima ispitivanja [201].

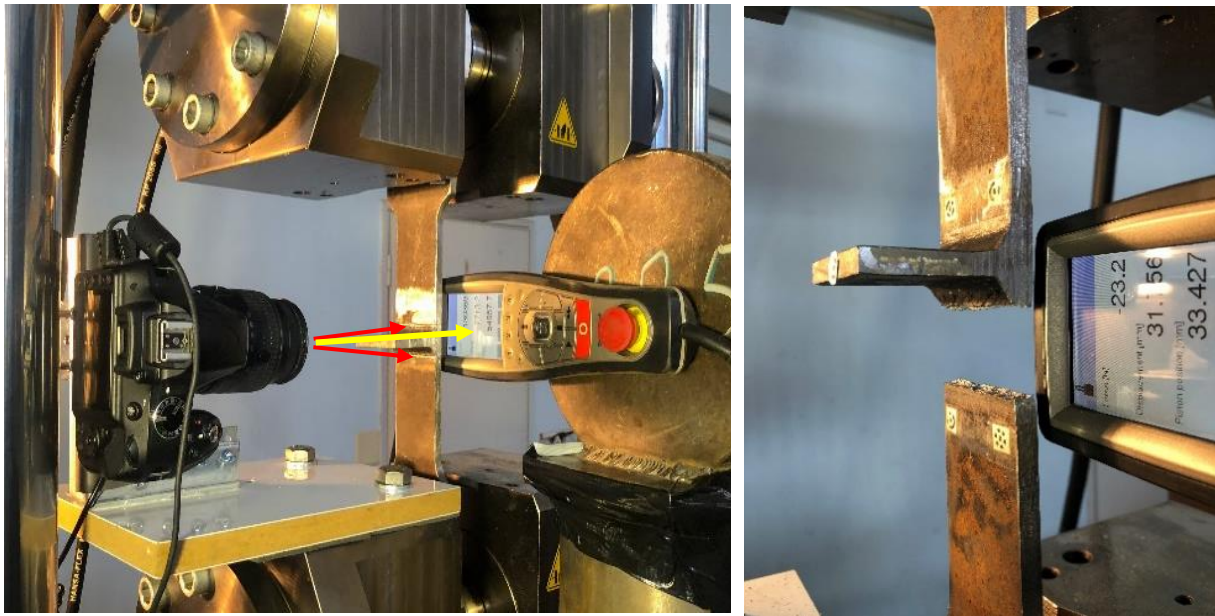
Sile i naprezanja konstantnih amplituda prikazane su u matrici ispitivanja (*engl. test matrix*) u tablici 5.16. Frekvencija ispitivanja je iznosila 17 Hz, osim u slučaju uzorka koji je pukao u osnovnom materijalu, gdje je frekvencija od 17 Hz proizvodila prevelike vibracije hidrauličke preše pa je smanjena na 12 Hz. Omjer naprezanja je za sva ispitivanja iznosio $R = 0,1$. Ukupni ispitni (testni) program uključuje 18 uzoraka podijeljenih u kategorije po tipu detalja (LA i TA) i stanju obrade (AW i HFMI). Zbog dugog trajanja svakog pojedinog ispitivanja (maksimalno je jedno ispitivanje trajalo 147 h), broj uzoraka i mogućih ispitivanja je ograničen. Nominalna debljina ploče uzorka je iznosila 8,0 mm, a stvarna 8,4 mm.

Tablica 5.16. Matrica cikličkih ispitivanja laboratorijskih uzoraka

Oznaka uzorka	Materijal	F_{\max} [kN]	F_{\min} [kN]	ΔF [kN]	σ_{\max} [Mpa]	σ_{\min} [Mpa]	$\Delta\sigma$ [Mpa]
S355-LA-AW-01	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-AW-02	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-AW-03	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-AW-04	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-HFMI-01	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-HFMI-02	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-LA-HFMI-03	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-LA-HFMI-04	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-LA-HFMI-05	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-AW-01	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-TA-AW-02	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-AW-03	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-AW-04	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-HFMI-01	S355J2+N	92	9,2	82,8	219,05	21,90	197,14
S355-TA-HFMI-02	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-HFMI-03	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-HFMI-04	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00
S355-TA-HFMI-05	S355J2+N	112	11,2	100,8	266,67	26,67	240,00

Kako bi se pratio nastanak i širenje pukotine na rubovima zavora (najvjerojatnijim mjestima otkazivanja) prilikom cikličkog ispitivanja, koristi se fotogrametrija bliskog dometa. Ova metoda omogućuje brzo dobivanje točnih 3D podataka iz fotografija u visokoj preciznosti [202–205], a fotogrametrijski podaci moraju se prikupiti na razini ispod milimetra [206]. Ovo je u navedenim studijama uspješno postignuto tehnikama makro fotogrametrije [207–209]. Prema gore navedenim studijama i studijama za praćenje razvoja pukotina na rubovima zavora, postavljene su digitalne DSLR (*engl. Digital Single Lens Reflex*) kamere na udaljenosti od oko 20 - 30 cm od površine uzorka (slika 5.31). Točna udaljenost kamera određena je empirijski

(blizu teoretski izračunatoj hiperfokalnoj udaljenosti) za svaku vrstu uzorka kako bi se fokusirala očekivana područja nastanka pukotina (rubovi zavora). Kamere su spojene na besprekidno napajanje i računalo. Računalni program, DigiCamControl [210], omogućuju tzv. „*timelapse*“ snimanje svakih 10 sekundi. Računalo također pruža pohranu za svaku fotografiju snimljenu tijekom cikličkog testa. Sustav rasvjete sastoji se od dodatnih LED (*engl. Light Emitting Diode*) i halogenih žarulja koje su neophodne zbog potrebne velike brzine zatvarača kamere, što uvelike smanjuje količinu svjetlosti koja dopire do senzora DSLR kamere. Brzina zatvarača, otvor blende i ISO osjetljivost prilagođeni su svakom testu. Kako bi se na istoj fotografiji snimila pukotina na rubu zavora zajedno s brojem trenutnih ciklusa (N), postavlja se zaslon koji prikazuje broj ciklusa, kao što je prikazano na slici 5.31 (lijevo).



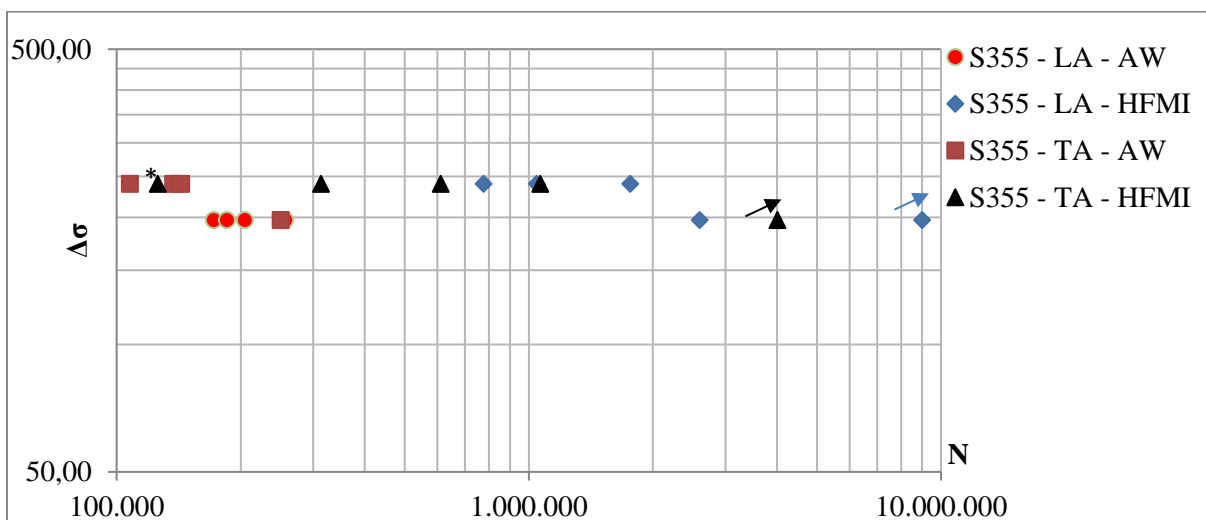
Slika 5.31. Fotografiranje rubova zavora i očitavanje broja ciklusa (lijevo) i otkazivanje uzorka na rubu zavora (desno)

5.8.2 Rezultati ispitivanja

Rezultati cikličkih ispitivanja na umor su prikazani tablicom 5.17 te dijagramom $\Delta\sigma$ -N, prikazanim u dvostrukom logaritamskom mjerilu (slika 5.32). Rezultati koji su u tablici i na dijagramu označeni sa strelicom „→“ predstavljaju uzorke koji nisu otkazali (engl. *runout*), dok se rezultat označen „*“ odnosi na otkazivanje uzorka u osnovnom materijalu.

Tablica 5.17. Rezultati cikličkih ispitivanja uzoraka od S355J2+N

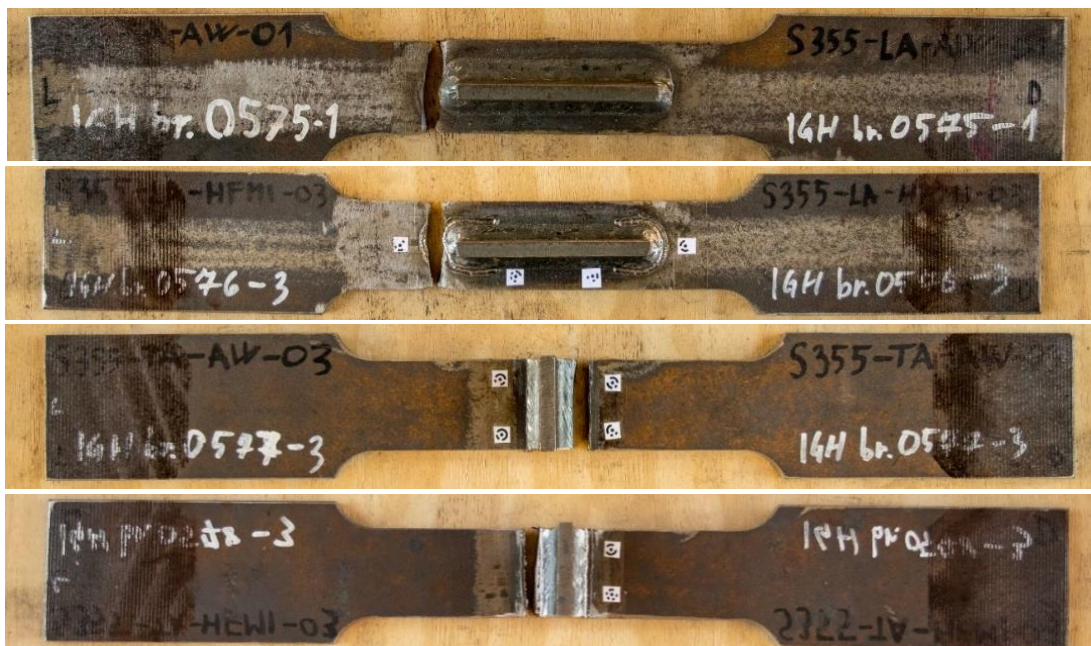
Detalj	Oznaka uzorka	σ_{max} [Mpa]	σ_{min} [Mpa]	$\Delta\sigma$ [Mpa]	N
S355-LA-AW	S355-LA-AW-01	219,05	21,90	197,14	168014
	S355-LA-AW-02	219,05	21,90	197,14	185091
	S355-LA-AW-03	219,05	21,90	197,14	256144
	S355-LA-AW-04	219,05	21,90	197,14	204328
S355-LA-HFMI	S355-LA-HFMI-01	219,05	21,90	197,14	2593208
	S355-LA-HFMI-02	219,05	21,90	197,14	9000000 →
	S355-LA-HFMI-03	266,67	26,67	240,00	1043711
	S355-LA-HFMI-04	266,67	26,67	240,00	1760015
	S355-LA-HFMI-05	266,67	26,67	240,00	776630
S355-TA-AW	S355-TA-AW-01	219,05	21,90	197,14	249997
	S355-TA-AW-02	266,67	26,67	240,00	136918
	S355-TA-AW-03	266,67	26,67	240,00	107516
	S355-TA-AW-04	266,67	26,67	240,00	143237
S355-TA-HFMI	S355-TA-HFMI-01	219,05	21,90	197,14	4010000 →
	S355-TA-HFMI-02	266,67	26,67	240,00	312728
	S355-TA-HFMI-03	266,67	26,67	240,00	1065580
	S355-TA-HFMI-04	266,67	26,67	240,00	125657*
	S355-TA-HFMI-05	266,67	26,67	240,00	610599



Slika 5.32. Rezultati ispitivanja uzoraka od S355J2+N prikazani dijagramom $\Delta\sigma$ -N

Iz rezultata je vidljivo značajno povećanje otpornosti na umor nakon primjene HFMI metode. Primjerice, pri razini naprezanja $\Delta\sigma = 197,14$ MPa, otkazivanje LA-AW detalja nastupa pri broju ciklusa između $N = 172014 - 256144$. Pri istom naprezanju, jedan je obrađeni uzorak otkazao pri $N = 2593208$ broja ciklusa, a drugi nije otkazao ni pri $N = 9000000$ broja ciklusa (run out). U slučaju TA detalja, pri razini naprezanja od $\Delta\sigma = 240,0$ MPa, otkazivanje u AW stanju nastupa pri broju ciklusa od $N = 107516 - 143237$, dok u obrađenom stanju pri istoj razini naprezanja otkazivanje nastupa kod $N = 312728 - 1065580$ broja ciklusa. Uzorci i zavari su izrađeni što je moguće sličnije. Međutim, još uvijek postoje neke razlike u geometrijskim i materijalnim svojstvima koje utječu na njihov životni vijek te su rezultati cikličkih ispitivanja raspršeni. Iako postoji evidentno povećanje otpornosti na zamor za HFMI obrađene detalje, uočena je veća raspršenost podataka u odnosu na AW detalje. Veće raspršenje u rezultatima kod HFMI obrađenih detalja uzrokuje upravo njihov dulji životni vijek.

Nadalje, rezultati ispitivanja upućuju na to da su TA detalji povoljniji za produljenje životnog vijeka HFMI obradom u odnosu na LA detalje. Za razliku naprezanja od $197,14$ MPa, LA detalji su imali životni vijek između 172014 ciklusa i 256144 ciklusa u AW stanju, dok je HFMI tretirani detalj imao životni vijek od 2593208 ciklusa. S druge strane, za istu razliku naprezanja, TA detalj ima životni vijek od 249997 ciklusa u AW stanju, dok detalj u HFMI tretiranom stanju nije otkazao niti pri 4010000 , što se bilježi kao „runout“. Primjer uzoraka koji su očekivano otkazali na rubu zavora prikazan je na slici 5.33.



Slika 5.33. Uzorci koji su očekivano otkazali na rubu zavora

Ispitivanje uzoraka S355-LA-HFMI-02 i S355-TA-HFMI-01 (slika 5.34) zaustavljano je na 4010000 i 9000000. Isti nisu doživjeli lom pri cikličkom naprežanju od $\Delta\sigma = 197,14$ MPa. Ispitivanje je zabilježeno kao „run out“.



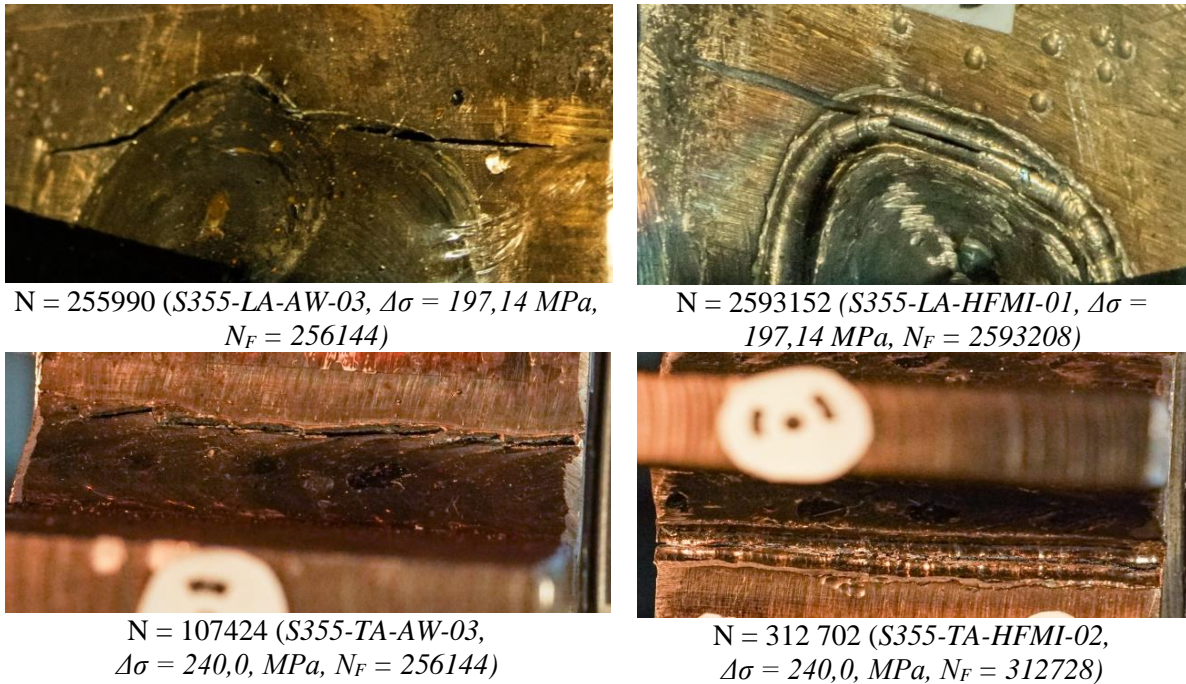
Slika 5.34. Uzorci S355-LA-HFMI-02 i S355-TA-HFMI-01 koji nisu otkazali („run out“)

Uzorak S355-TA-HFMI-04 je otkazao u osnovnom materijalu, što upućuje na grešku u osnovnom materijalu (slika 5.35).



Slika 5.35. Uzorak S355-TA-HFMI-04 koji je otkazao u osnovnom materijalu (dolje)

Slika 5.36 prikazuje primjere fotografija pukotina na rubu zavora zabilježene digitalnom SLR kamerom prije samog loma AW i HFMI obrađenih detalja. Pukotina nastaje na mjestu najveće koncentracije naprežanja i širi se u osnovni materijal sve do otkazivanja uzorka.



Slika 5.36. *Primjeri pukotina prije samog otkazivanja na rubu vara zavarenih detalja izloženih umoru*

5.8.3 Analiza plohe loma

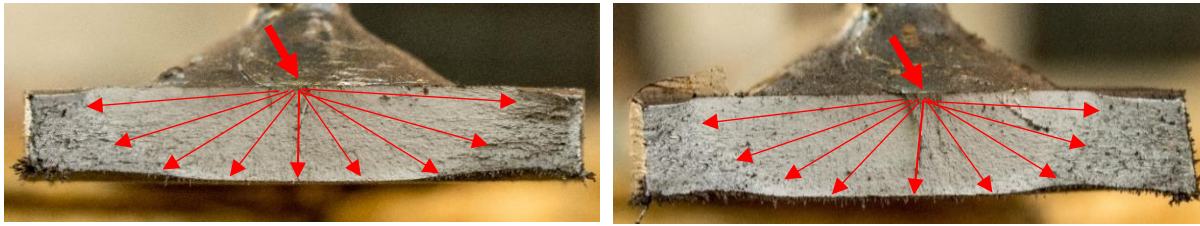
U nastavku su prikazane i analizirane karakteristične plohe loma uzoraka ispitanih na umor pri konstantnim amplitudama. Većina ispitanih uzoraka otkazalo je na rubu zavara, što je ujedno i očekivano mjesto otkazivanja. Uzorak S355-TA-HFMI-04 je otkazao u osnovnom materijalu, što se vjerojatno dogodilo zbog greške u materijalu (pora ili šupljina). Navedeni uzorak je otkazao s cikličkim naprezanjem od $\Delta\sigma = 240$ MPa pri broju promjena od $N_f = 125\ 657$. Ploha loma uzorka S355-TA-HFMI-04 prikazana je na slici 5.37.



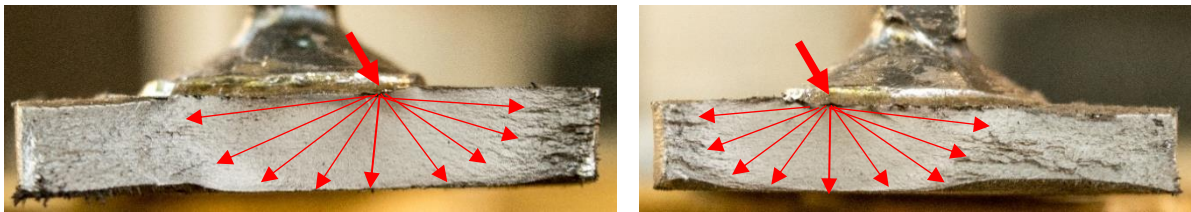
Slika 5.37. *Ploha loma uzorka S355-TA-HFMI-04*

U slučaju LA detalja, pukotine obično nastaju u AW stanju u sredini uzorka, kako je prikazano na slici 5.38, dok kod HFMI obrađenih uzoraka nastala pukotina ima određeni pomak u odnosu na sredinu (slika 5.39). Na slikama u nastavku se uočavaju dvije faze otkazivanja uzorka, faza rasta pukotine zbog umora te duktilni lom. Glatka ploha je karakteristična za fazu rasta pukotine

zbog umora, dok ostatak plohe loma, koji je hrpav i visoko deformiran, odgovara duktilnom lomu trenutak prije otkazivanja uzorka.

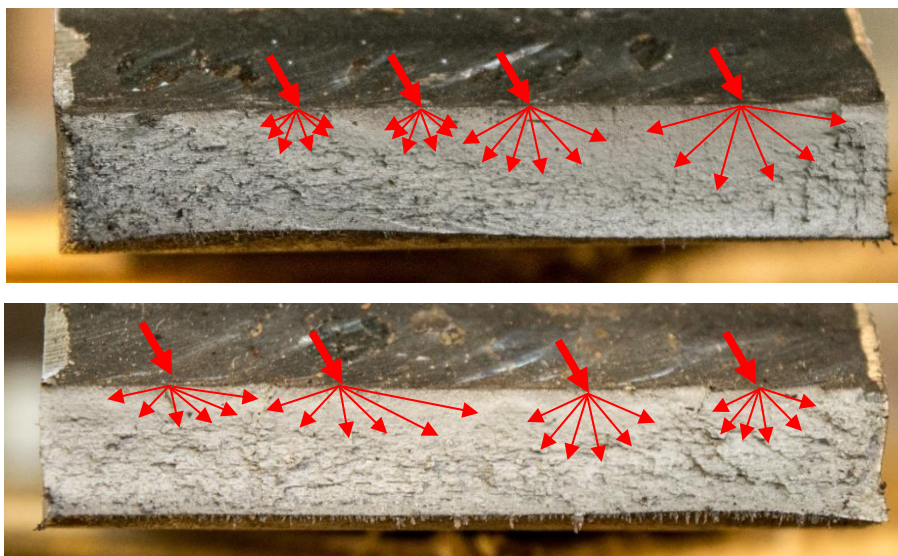


Slika 5.38. Plohe loma uzoraka S355-LA-AW-01 (lijevo) i S355-LA-AW-03 (desno)



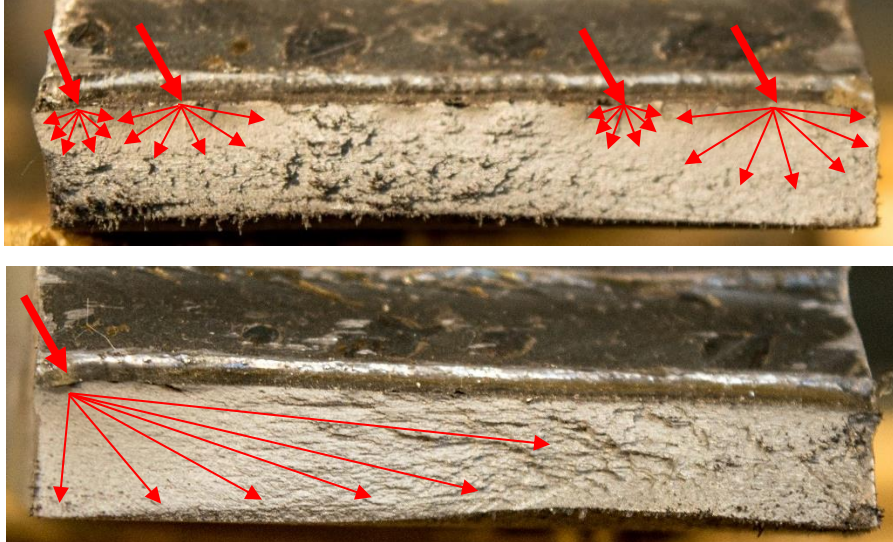
Slika 5.39. Plohe loma uzoraka S355-LA-HFMI-01 (lijevo) i S355-LA-HFMI-03 (desno)

Kod uzorka S355-LA-HFMI-01 je veća glatka ploha koja je karakteristična za rast pukotine kod umora, za razliku od plohe uzoraka S355-LA-HFMI-03, S355-LA-HFMI-04 i S355-LA-HFMI-05. Razlog tome je što je prvi uzorak izložen manjem cikličnom naprezanju $\Delta\sigma = 197,14$ Mpa, dok su ostali izloženi $\Delta\sigma = 240$ MPa. Smanjenjem naprezanja, povećava se glatka površina koja odgovara otkazivanju umorom, a smanjuje se duktilna ploha loma. U slučaju TA-AW detalja, uočava se više točaka nastanka pukotina na rubu zavora, duž linije zavora. Uočena mjesta nastanka i širenja pukotine su prikazana crvenim strelicama na slici 5.40.



Slika 5.40. Plohe loma uzoraka S355-TA-AW-01 (gore) i S355-TA-AW-03 (dolje)

Slika 5.41 prikazuje plohe loma TA detalja obrađenih HFMI metodom. U ovom slučaju, inicijalne pukotine se uočavaju blizu rubova uzorka (slika 5.41, gore) ili na samom rubu uzorka (slika 5.41, dolje).



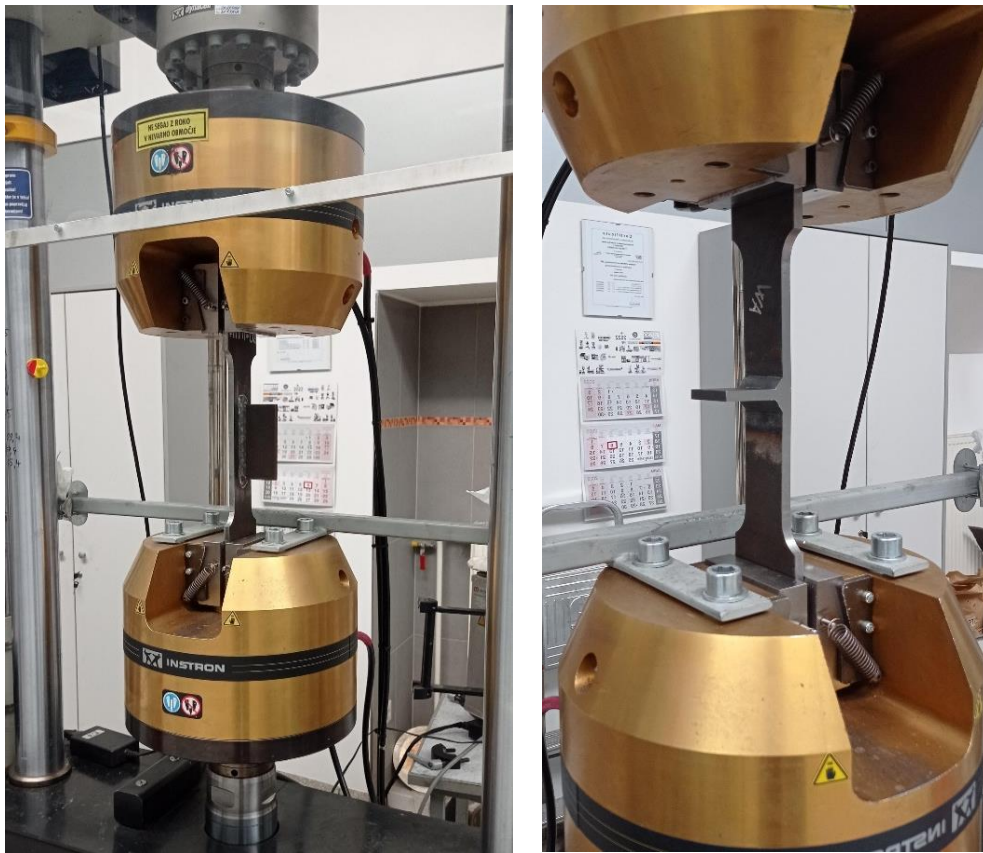
Slika 5.41. Plohe loma uzoraka S355-TA-HFMI-02 (gore) i S355-TA-HFMI-03 (dolje)

HFMI obrada kod TA detalja, kako je vidljivo na slikama 5.40 i 5.41, uzrokuje pomicanje lokacije nastanka pukotine prema rubovima uzorka. Ovaj trend je svakako potrebno dodatno istražiti.

5.9 Cikličko ispitivanje uzoraka izrađenih od čelika S690QL

5.9.1 Uvod i plan ispitivanja

Cikličko ispitivanje uzoraka izrađenih od čelika kvalitete S690QL je provedeno u „Laboratoriju za mehanske preiskave“ na „Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije“ u Ljubljani, Slovenija. Ispitivanja su provedena na dinamičkoj preši Instron 8802 (slika 5.42). Ispitivanja su provedena pri cikličkim naprezanjima konstantnih amplituda.



Slika 5.42. Cikličko ispitivanje uzoraka S690-LA-HFMI-02 (lijevo) i S690-TA-AW-01 (desno)

Ispitivanja su se, kao i u slučaju uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N, također provodila sve do loma, odnosno sve dok ciklična naprezanja određene konstantne amplitude nisu uzrokovala otkazivanje elementa. Sile i naprezanja konstantnih amplituda prikazane su u matrici ispitivanja u tablici 5.20. Ukupni ispitni (testni) program se sastojao od 10 uzoraka podijeljenih u kategorije po tipu detalja (LA i TA detalji) te stanju obrade (AW i HFMI). Nominalna debljina ploče uzoraka je iznosila 8,0 mm, a stvarna 7,9 mm. Svi uzorci su ispitani pri istim parametrima ispitivanja prikazanim u tablici 5.18.

Tablica 5.18. Matrica cikličkih ispitivanja uzoraka izrađenih od čelika S690QL

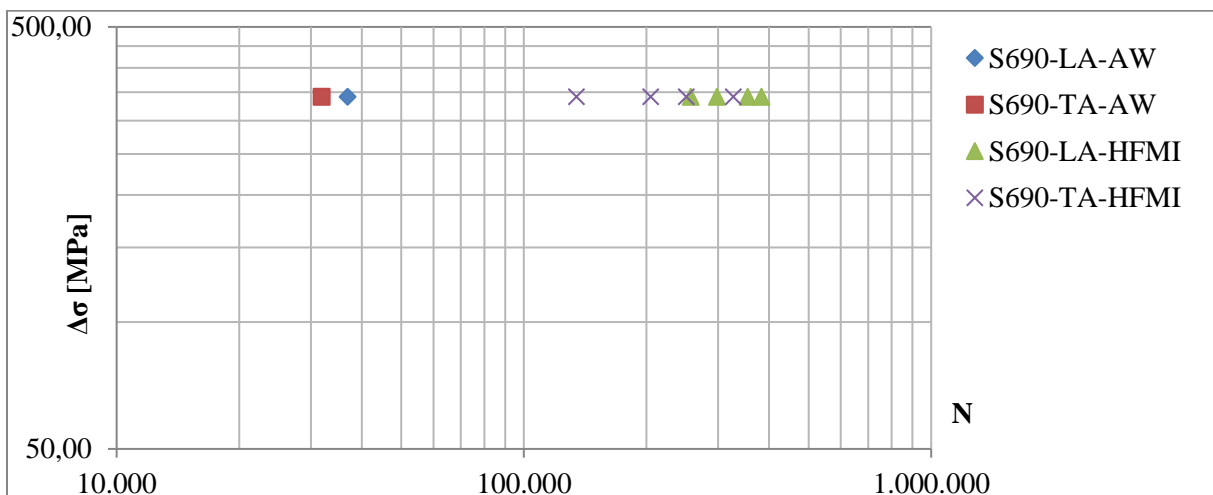
Materijal	F _{max} [kN]	F _{min} [kN]	ΔF [kN]	σ _{max} [Mpa]	σ _{min} [Mpa]	Δσ [Mpa]	R	f [Hz]
S690QL	150	15	135	379,75	37,97	341,77	0,1	10

5.9.2 Rezultati ispitivanja

Rezultati cikličkih ispitivanja su prikazani tablicom 5.10 te dijagramom Δσ-N, prikazanim u dvostrukom logaritamskom mjerilu (slika 5.43). Rezultati koji su u tablici i na dijagramu označeni sa „*“ odnose se na otkazivanje uzorka u osnovnom materijalu.

Tablica 5.19. Rezultati cikličkih ispitivanja uzoraka izrađenih od čelika S690QL

Detalj	Oznaka uzorka	σ _{max} [Mpa]	σ _{min} [Mpa]	Δσ [Mpa]	N
S690-LA-AW	S690-LA-AW 01	379,75	37,97	341,77	36848
S690-LA-HFMI	S690-LA-HFMI 01	379,75	37,97	341,77	256431
	S690-LA-HFMI-02	379,75	37,97	341,77	297803*
	S690-LA-HFMI-03	379,75	37,97	341,77	354332
	S690-LA-HFMI-04	379,75	37,97	341,77	382948*
S690-TA-AW	S690-TA-AW-01	379,75	37,97	341,77	31.835
S690-TA-HFMI	S690-TA-HFMI-01	379,75	37,97	341,77	134558
	S690-TA-HFMI-02	379,75	37,97	341,77	250082*
	S690-TA-HFMI-03	379,75	37,97	341,77	204765
	S690-TA-HFMI-04	379,75	37,97	341,77	326518*



Slika 5.43. Rezultati ispitivanja uzoraka od S690QL prikazani dijagramom Δσ-N

Kao i u slučaju uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N, iz rezultata je vidljivo značajno povećanje otpornosti na umor nakon primjene HFMI metode. Primjerice, pri razlici napreznja

$\Delta\sigma = 379,75\text{MPa}$, otkazivanje LA-AW detalja nastupa pri broju ciklusa od $N = 36848$. Pri istoj razlici napreznja, HFMI obrađeni LA detalji su otkazali pri broju ciklusa od $N = 256431 - 382948$. U slučaju TA detalja, pri razlici napreznja od $\Delta\sigma = 379,75\text{MPa}$, otkazivanje u AW stanju nastupa pri broju ciklusa od $N = 31835$, dok u HFMI obrađenom stanju pri istoj razlici napreznja otkazivanje nastupa kod $N = 134558 - 326518$ broja ciklusa. Rezultati ispitivanja upućuju na to da su u ovom slučaju LA detalji povoljniji za produljenje životnog vijeka HFMI obradom u odnosu na TA detalje. Slika 5.44 prikazuje primjer detalja (S690-LA-HFMI-03) koji je otkazao na rubu zavora.



Slika 5.44. Uzorak S690-LA-HFMI-03 koji je otkazao na rubu zavora

Uzorci S690-LA-HFMI-02, S690-LA-HFMI-04, S690-TA-HFMI-02 i S690-TA-HFMI-04 su otkazali u osnovnom materijalu (slika 5.45). Unatoč tome, rezultati i dalje pokazuju značajno povećanje životnog vijeka ovakvih detalja.



Slika 5.45. Uzorak S690-LA-HFMI-04 koji je otkazao u osnovnom materijalu

5.9.3 Analiza plohe loma

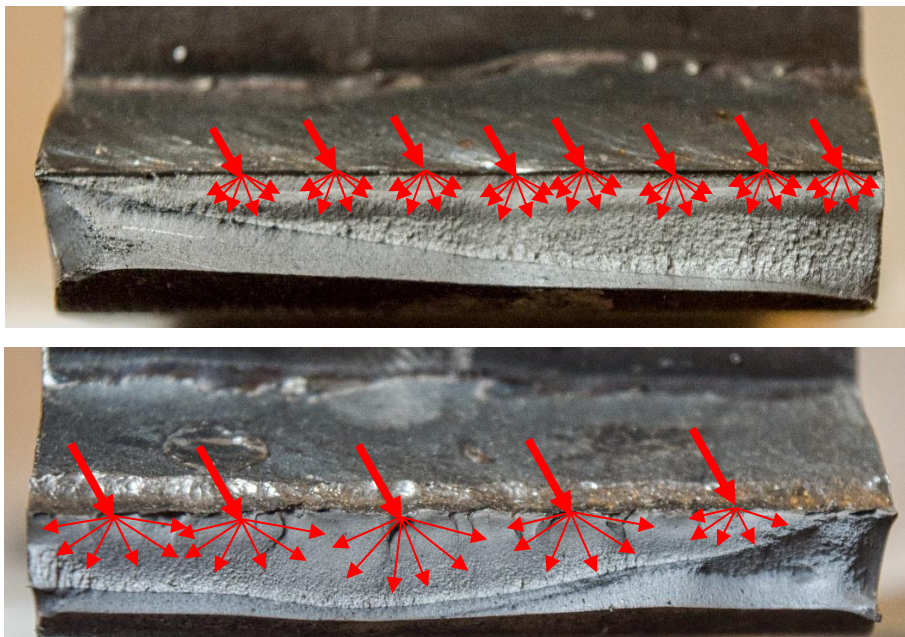
U nastavku su prikazane i analizirane karakteristične plohe loma uzoraka izrađenih od čelika S690QL ispitanih na umor pri konstantnim amplitudama. Većina ispitanih uzoraka otkazalo je na rubu zavora, što je ujedno i očekivano mjesto otkazivanja. Pukotine u slučaju LA-AW i LA-HFMI detalja nastaju otprilike u sredini uzorka (slika 5.46). Uočavaju se dvije faze otkazivanja uzorka, faza rasta pukotine zbog umora te duktilni lom. Uočena mjesta te smjer širenja pukotine zbog umora su prikazani crvenim strelicama. Glatka ploha je karakteristična za fazu rasta

pukotine zbog umora, dok ostatak plohe loma, koji je visoko deformiran, odgovara duktilnom lomu uzorka.



Slika 5.46. Plohe loma uzorka S690-LA-AW-01 (lijevo) i S690-LA-HFMI-03 (desno)

U slučaju TA-AW i TA-HFMI detalja, uočava se više točaka nastanka pukotina na rubu zavora, duž linije zavora (slika 5.47). Uočena mjesta nastanka i širenja pukotine su prikazana crvenim strelicama. Glatka ploha je karakteristična za fazu rasta pukotine zbog umora, dok ostatak plohe loma, koji je hrapav i visoko deformiran, odgovara duktilnom lomu uzorka.



Slika 5.47. Plohe loma uzoraka S690-TA-HFMI-01 (gore) i S690-TA-HFMI-03 (dolje)

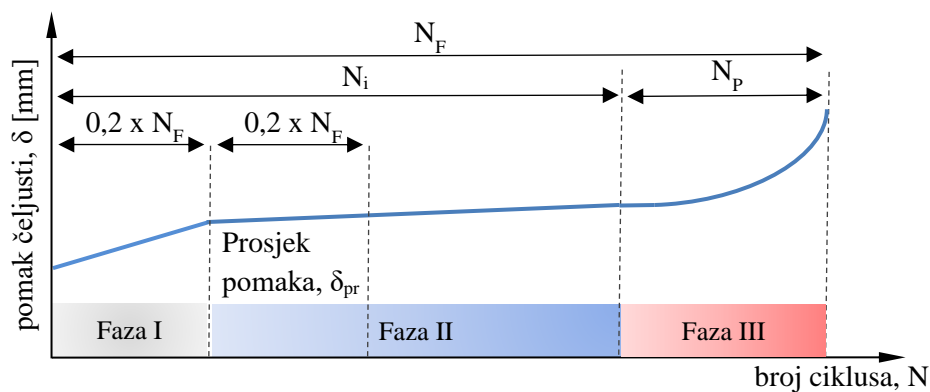
5.10 Procjena perioda nastanka i širenja tehničke pukotine

5.10.1 Uvod

Kako bi se procijenio kraj perioda nastanka, N_i , te početak širenja tehničke pukotine, N_p , koristi se zapis pomaka čeljusti hidrauličke preše popraćen analizom fotografija ruba zavara koje su zabilježene prilikom cikličkih ispitivanja, što je opisano u točki 5.8. Zapis vrijednosti maksimalnih pomaka čeljusti po ciklusima prilikom cikličkih ispitivanja uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N, prikazan je u prilogu C.

5.10.2 Procjena prema zapisu pomaka čeljusti hidrauličke preše

Analizirajući pomake čeljusti, primjećuju se tri faze (slika 5.48). U fazi I životnoga vijeka promatranih detalja uočava se blago povećanje pomaka do točke stabilizacije. Nakon određenog vremena, u fazi II se pomaci stabiliziraju s vrlo blagim rastom te se konačno u fazi III progresivno povećavaju sve do otkazivanja detalja. Faze I i II čine period nastanka a faza III se odnosi na period širenja tehničke pukotine.



Slika 5.48. Faze pomaka čeljusti

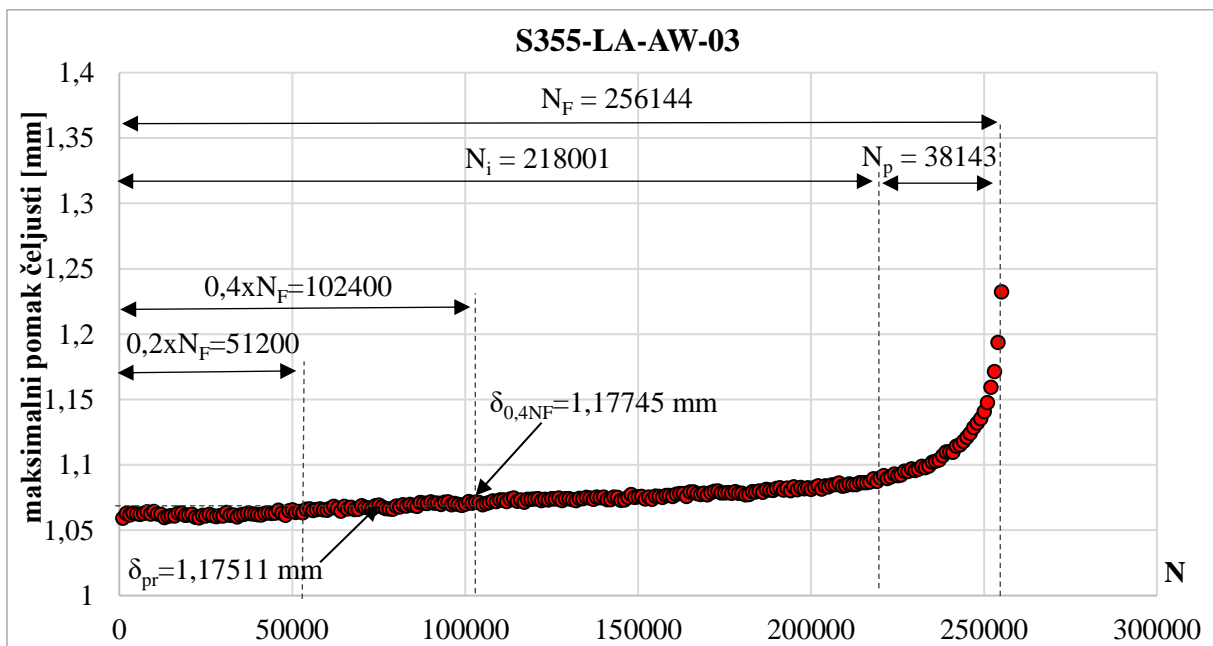
Kako bi se preciznije razlučile faze I i II od faze III, usvojena je sljedeća metoda:

- 1) Usvaja se pretpostavka da faza I traje prvih 20% životnoga vijeka. Vrijednosti pomaka u ovoj fazi se zanemaruju i isključuju iz daljnjih razmatranja.
- 2) Proračunava se aritmetička sredina pomaka u sljedećih 20% broja ciklusa te se dobiva vrijednost δ_{pr} . Također se utvrđuje i trenutni pomak $\delta_{0,4N_F}$ pri broju ciklusa $N = 0,4 \cdot N_F$.
- 3) Proračunava se omjer $R_A = \delta_{pr} / \delta_{0,4N_F}$.

- 4) Promatra se u kojem ciklusu omjer $R = \delta/\delta_{0,4NF}$ odstupa od omjera R_A za 1,5%. Pri tom broju ciklusa se smatra da je završila faza II, odnosno, da je završio period nastanka tehničke pukotine te je započelo njezino širenje.

Slika 5.49 prikazuje primjer procjene perioda nastanka pukotine za detalj S355-LA-AW-01 prema opisanoj metodi:

- 1) Prvih 51200 ciklusa koji odgovaraju fazi I se isključuju iz razmatranja.
- 2) Prosječni maksimalni pomak čeljusti u sljedećih 51200 ciklusa iznosi $\delta_{pr} = 1,17511$ mm, a trenutni pomak pri $N = 0,4 \cdot N_F = 102400$ iznosi $\delta_{0,4NF} = 1,17745$.
- 3) $R_A = \delta_{pr} / \delta_{0,4NF} = 0,99802$.
- 4) Odstupanje trenutnog omjera $R = \delta/\delta_{0,4NF}$ u iznosu od 1,5% od omjera R_A nastaje pri 218001 ciklusa.



Slika 5.49. Primjer procjene perioda nastanka i širenja pukotine (S355-LA-AW-03)

Prema navedenoj metodi, provedena je procjena perioda nastanka (N_i) i širenja tehničke pukotine (N_p). Rezultati procjene su prikazani tablicom 5.20.

Tablica 5.20. *Periodi nastanka i širenja pukotine prema pomacima čeljusti preše*

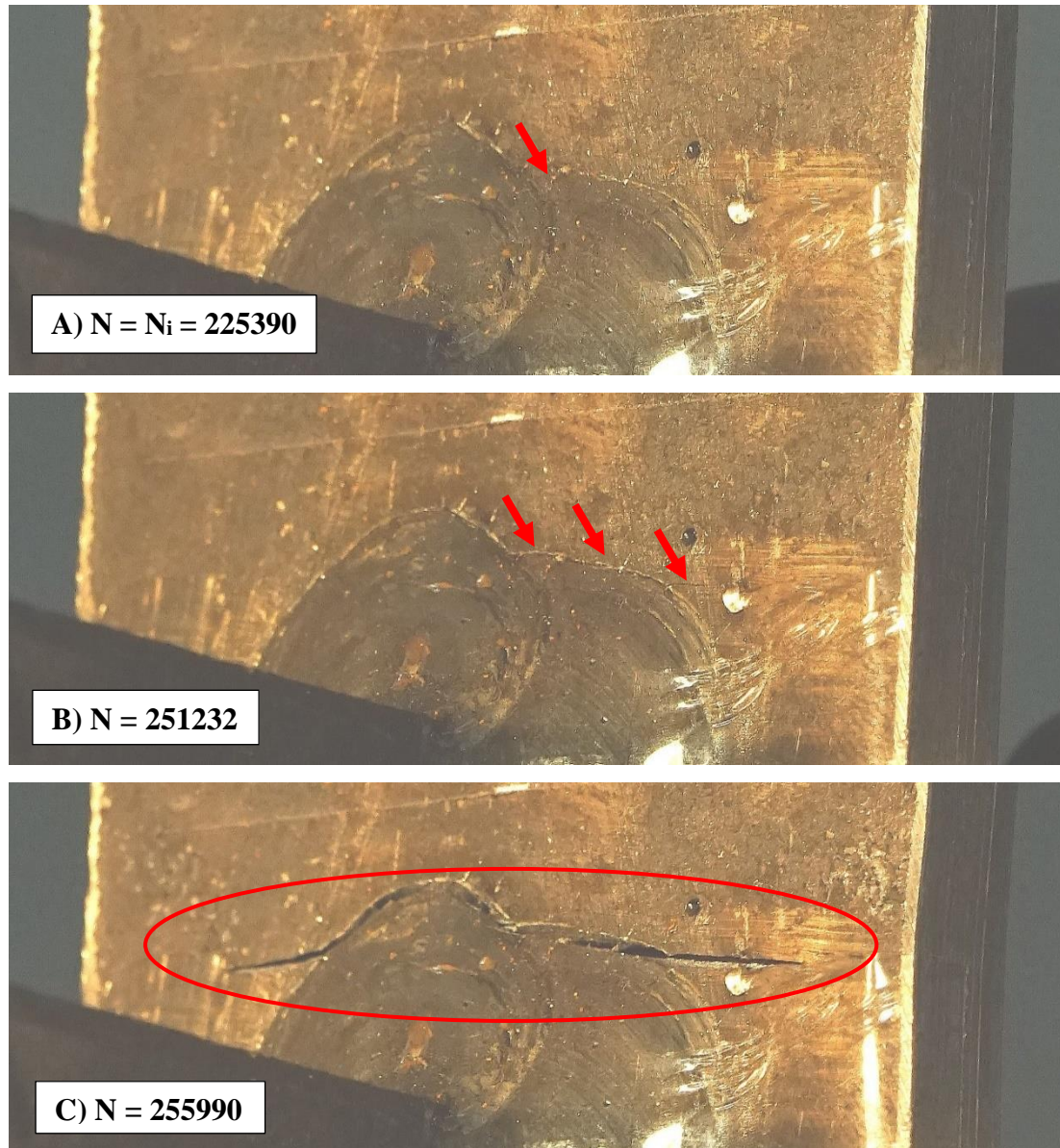
Oznaka uzorka	N_i	N_p	N_F	N_i/N_F [%]	N_p/N_F [%]
S355-LA-AW-01	110000	58014	168014	65,50	34,50
S355-LA-AW-02	151000	34091	185091	81,60	18,40
S355-LA-AW-03	218001	38143	256144	85,10	14,90
S355-LA-AW-04	136000	68328	204328	66,60	33,40
S355-LA-HFMI-01	2567001	26207	2593208	98,99	1,01
S355-LA-HFMI-04	1747001	13014	1760015	99,30	0,70
S355-LA-HFMI-05	768001	8629	776630	98,9	1,1
S355-TA-AW-01	240001	9996	249997	96,00	4,00
S355-TA-AW-02	123000	13918	136918	89,80	10,20
S355-TA-AW-03	95000	12516	107516	88,40	11,60
S355-TA-AW-04	102000	41237	143237	71,20	28,80
S355-TA-HFMI-02	296000	16728	312728	94,70	5,30
S355-TA-HFMI-03	1056001	9579	1065580	99,10	0,90
S355-TA-HFMI-05	607000	3599	610599	99,40	0,60

Navedena metoda procjene perioda nastanka i širenja pukotine pomoću pomaka čeljusti preše potvrđena je u nastavku analizom fotografija rubova zavara snimljenih prilikom cikličkih ispitivanja, kako je prikazano u točki 5.8.

5.10.3 Procjena prema analizi fotografija rubova zavara detalja

Kako bi se potvrdila ranije usvojena proračunska metoda procjene perioda nastanka i širenja tehničke pukotine prema pomacima čeljusti hidrauličke preše, provedena je analiza fotografija rubova zavara snimljenih tijekom cikličkih ispitivanja zavarenih detalja. Na određenoj udaljenosti od ruba zavara su postavljene digitalne kamere koje fotografiraju rub zavara u jednakim vremenskim intervalima svakih 10 sekundi. Uz uzorak se postavlja i zaslon koji prikazuje trenutni broj ciklusa (N) kako bi se mogle fotografije povezati s pripadajućim pomacima čeljusti (δ) (slika 5.31). Snimanje fotografija je detaljnije opisano u točki 5.8. Fotografije su nakon ispitivanja obrađene te su pomoću izrezivanja dijela fotografije te filtera izoštravanja i povećanja svjetline fotografije dodatno naglašeni rubovi zavara detalja kao i snimljene pukotine.

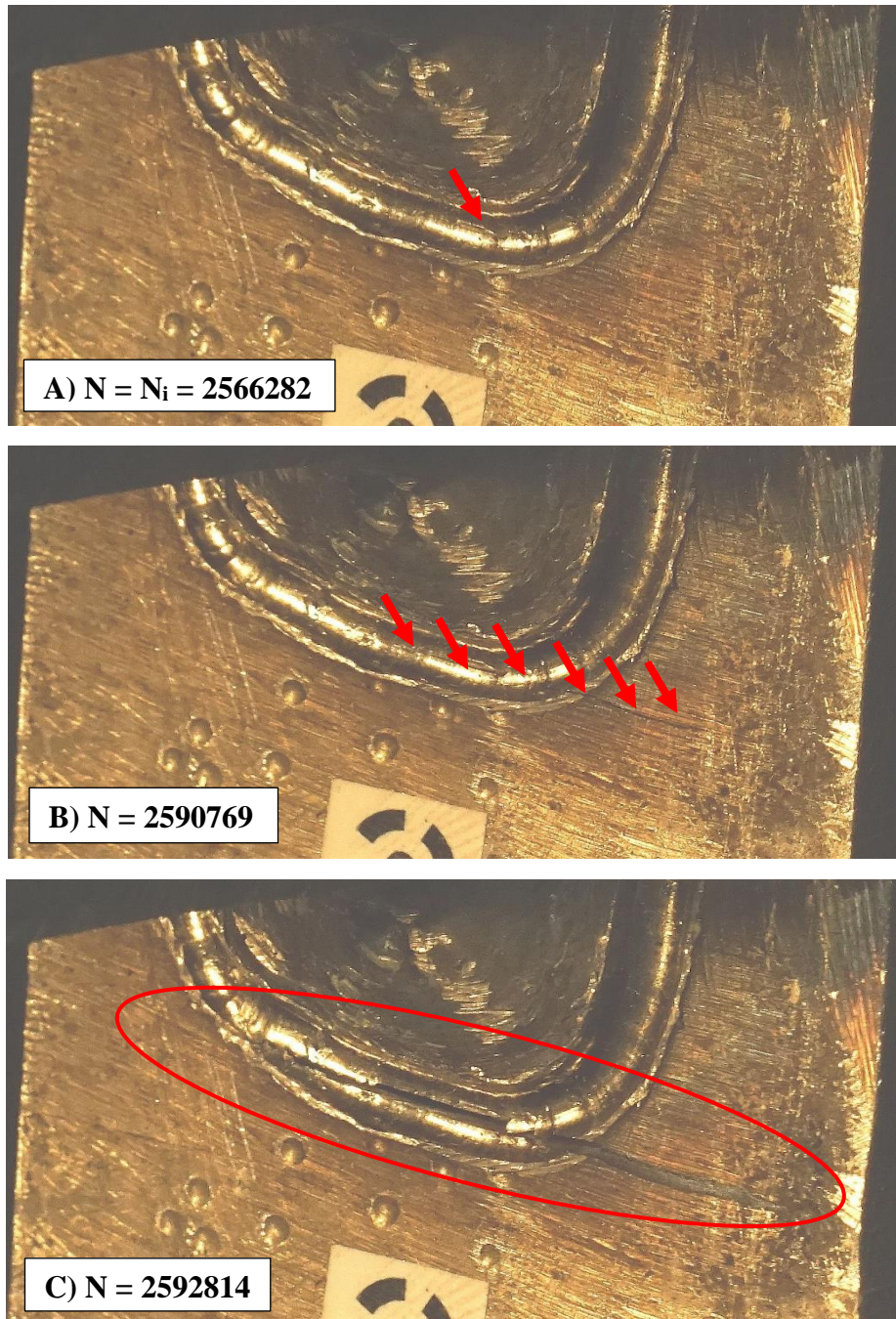
Slika 5.50 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-LA-AW-03 u različitim fazama njega životnoga vijeka. Na fotografiji 5.50 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.50 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 251232$, dok slika 5.50 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.50. Pukotina na rubu zavora detalja S355-LA-AW-03

Prema analizi fotografija za detalj S355-LA-AW-03, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 225390$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

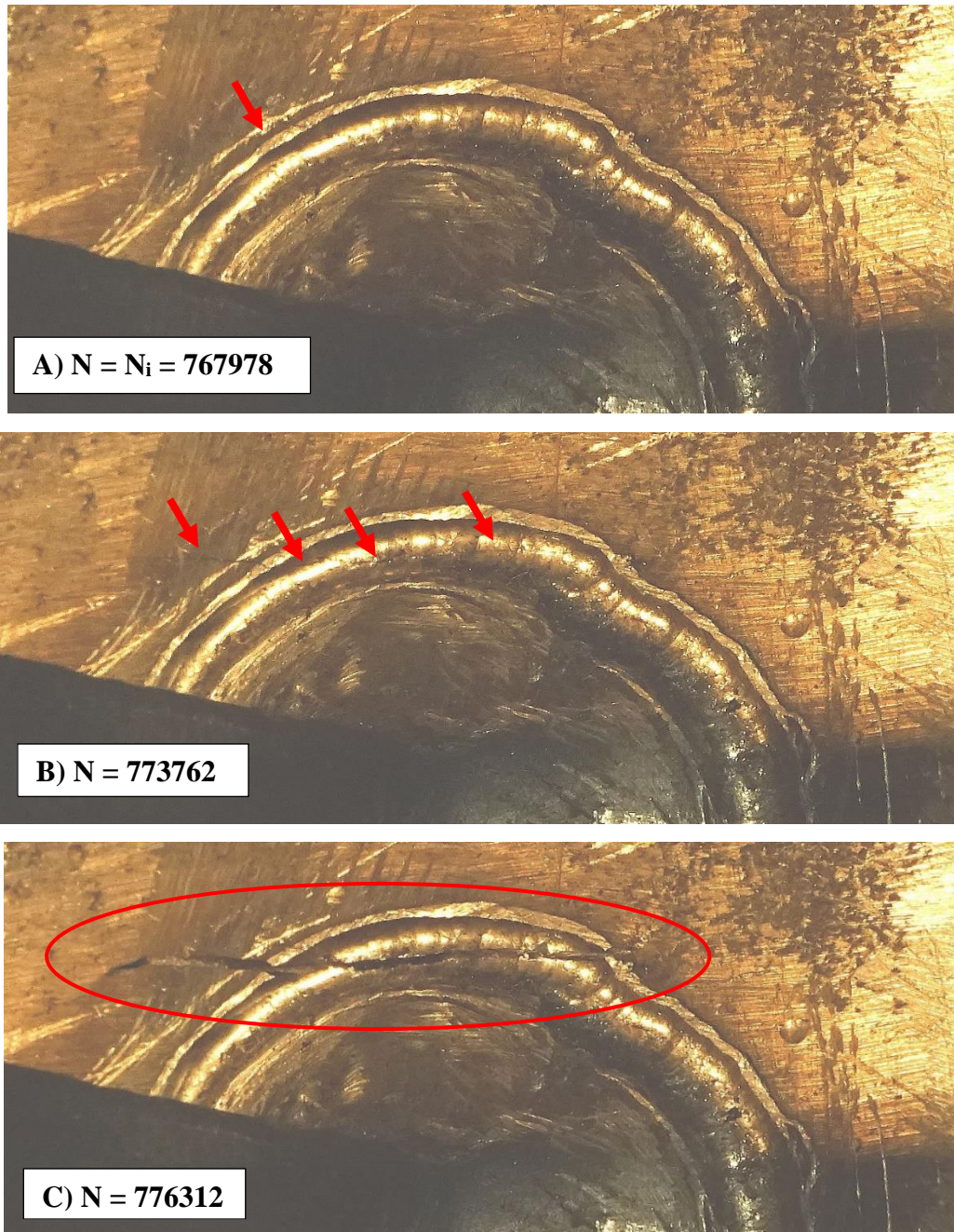
Slika 5.51 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-LA-HFMI-01 u različitim fazama njegova životnoga vijeka. Na fotografiji 5.51 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.51 b) pokazuje proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 2590769$ ciklusa, dok slika 5.51 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.51. Pukotina na rubu zavora detalja S355-LA-HFMI-01

Prema analizi fotografija za detalj S355-LA-HFMI-01, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 2566282$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

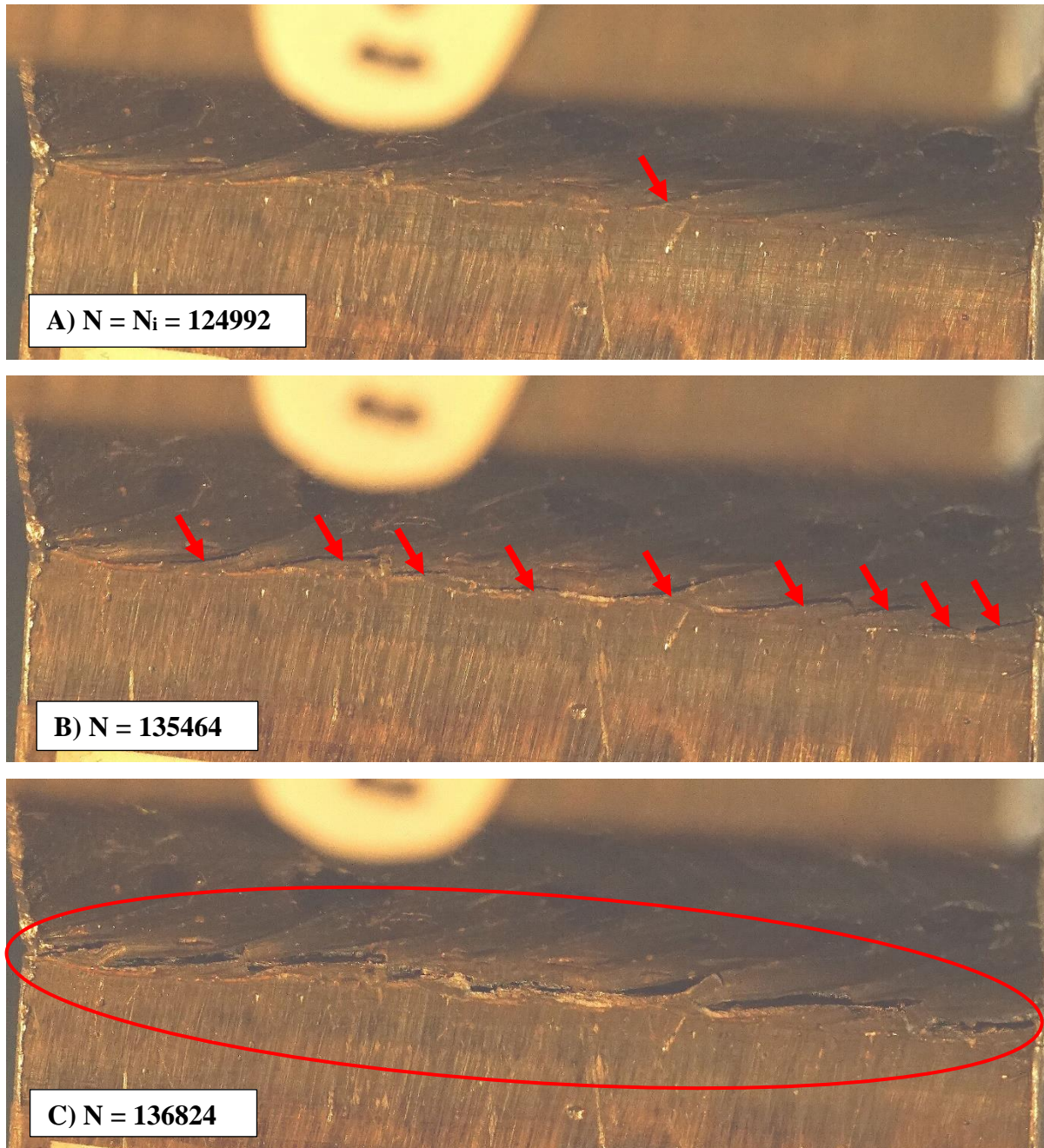
Slika 5.52 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-LA-HFMI-05 u različitim fazama njega životnoga vijeka. Na fotografiji 5.52 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.52 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 773762$ ciklusa, dok slika 5.52 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.52. Nastala pukotina rubi zavora detalja S355-LA-HFMI-05

Prema analizi fotografija za detalj S355-LA-HFMI-05, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 767978$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

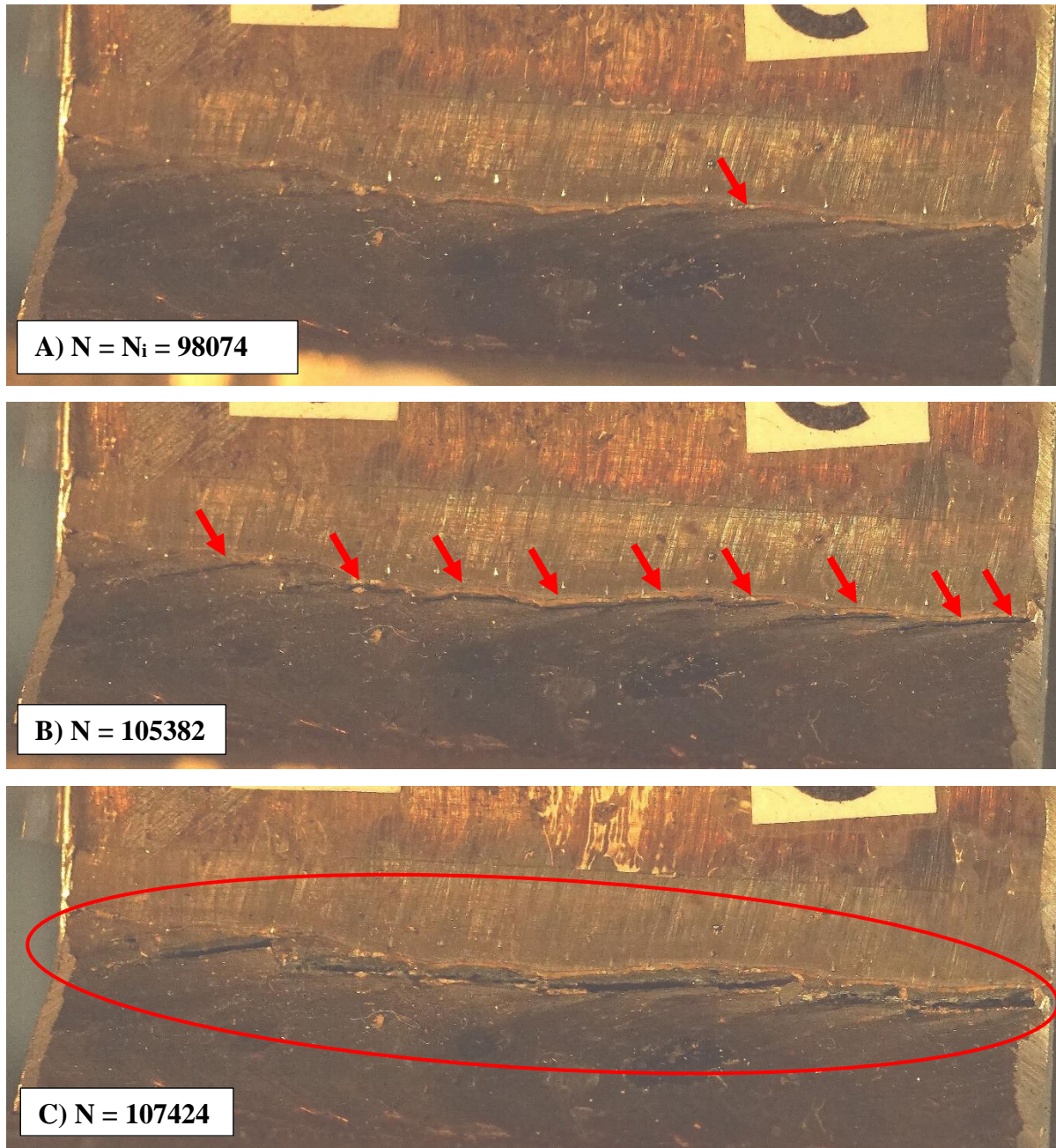
Slika 5.53 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-TA-AW-02 u različitim fazama njegova životnoga vijeka. Na fotografiji 5.53 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.53 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 135464$ ciklusa, dok slika 5.53 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.53. Nastala pukotina rubi zavora detalja S355-TA-AW-02

Prema analizi fotografija za detalj S355-TA-AW-02, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 124992$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

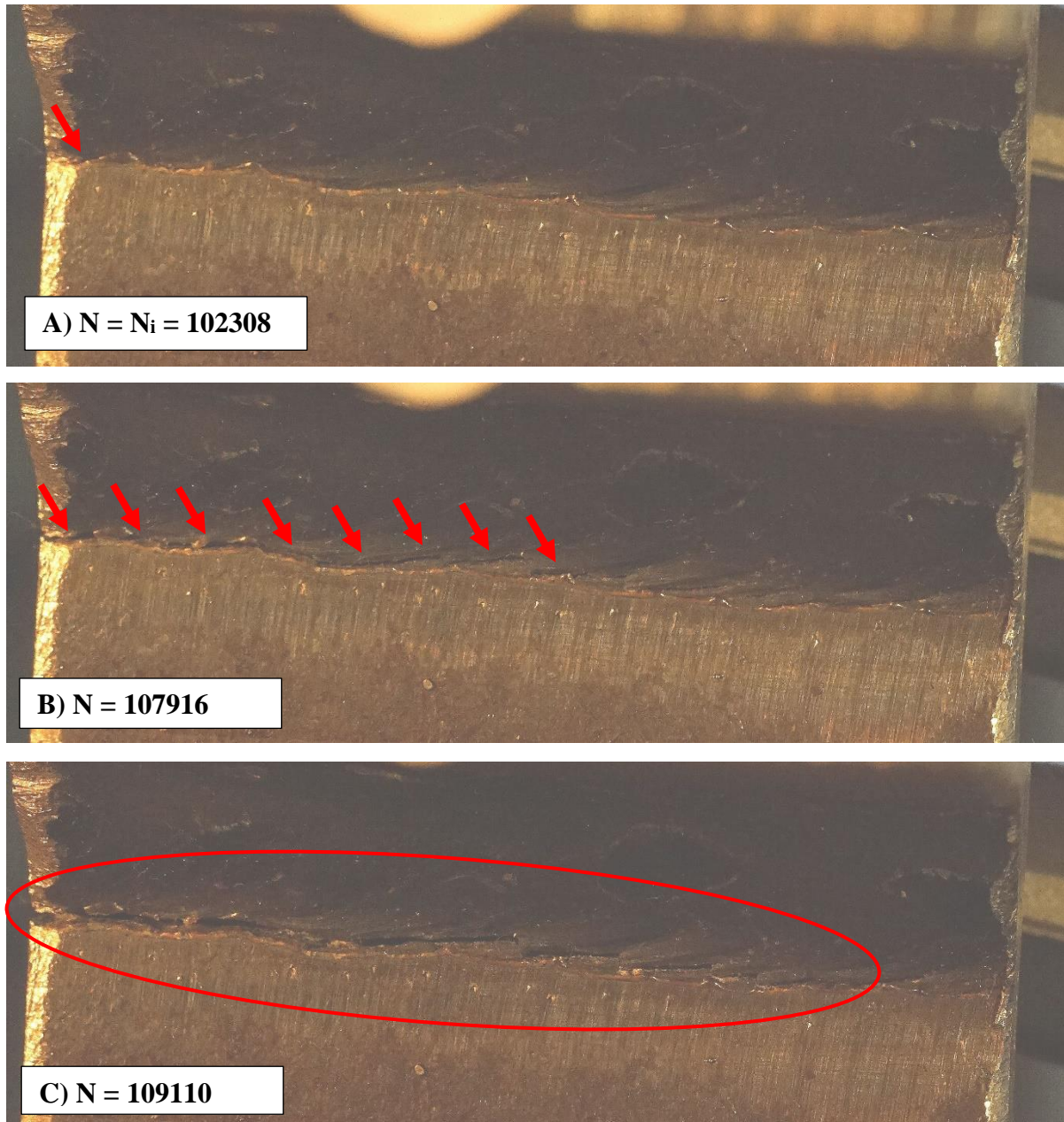
Slika 5.54 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-TA-AW-03 u različitim fazama njega životnoga vijeka. Na fotografiji 5.54 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.54 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 105382$ ciklusa, dok slika 5.54 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.54. Pukotina na rubu zavora detalja S355-TA-AW-03

Prema analizi fotografija za detalj S355-TA-AW-03, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 98074$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

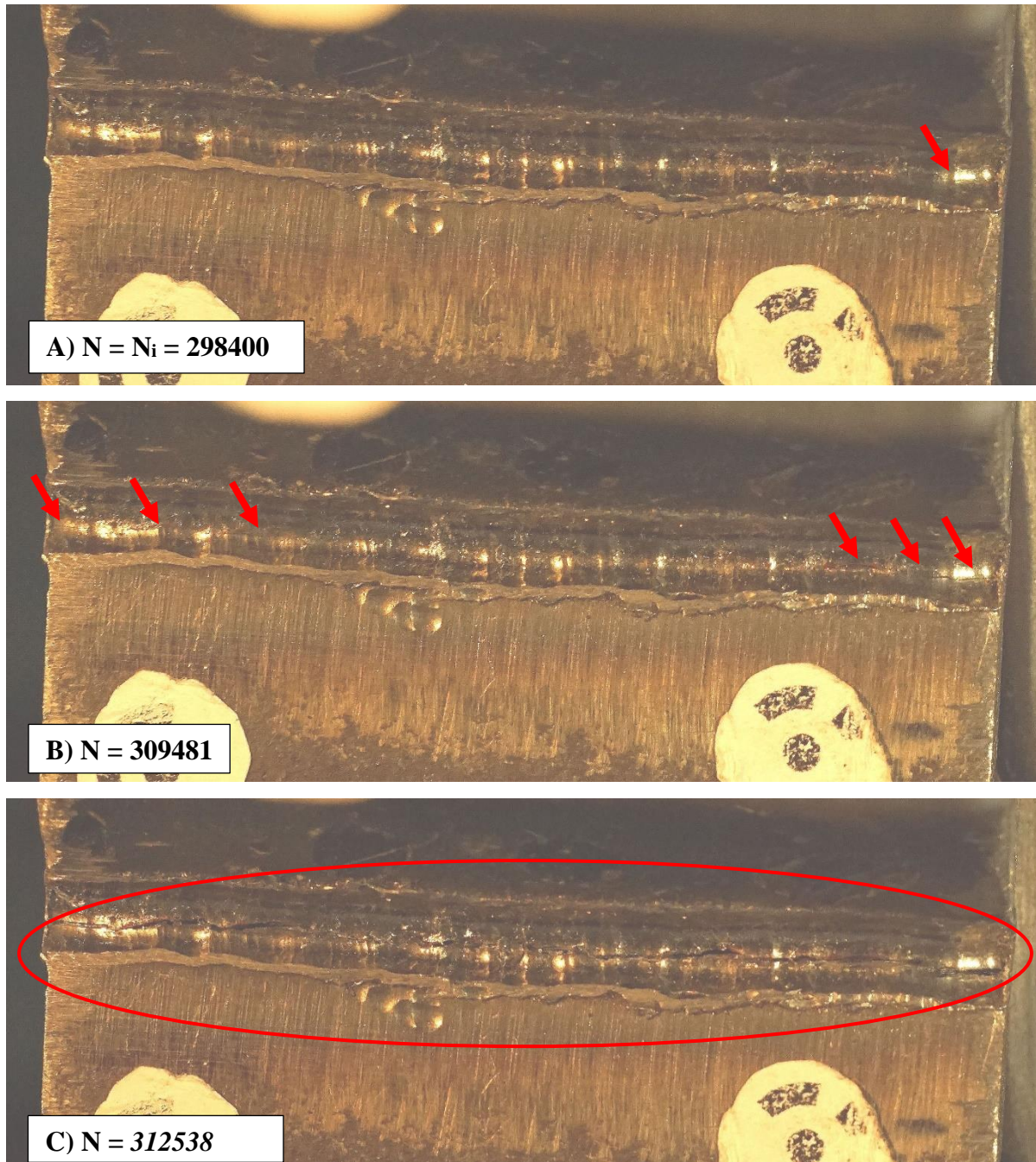
Slika 5.55 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-TA-AW-04 u različitim fazama njegova životnoga vijeka. Na fotografiji 5.55 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.55 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 107916$ ciklusa, dok slika 5.55 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.55. Pukotina nastala na rubu zavora detalja S355-TA-AW-04

Prema analizi fotografija za detalj S355-TA-AW-04, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 102308$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

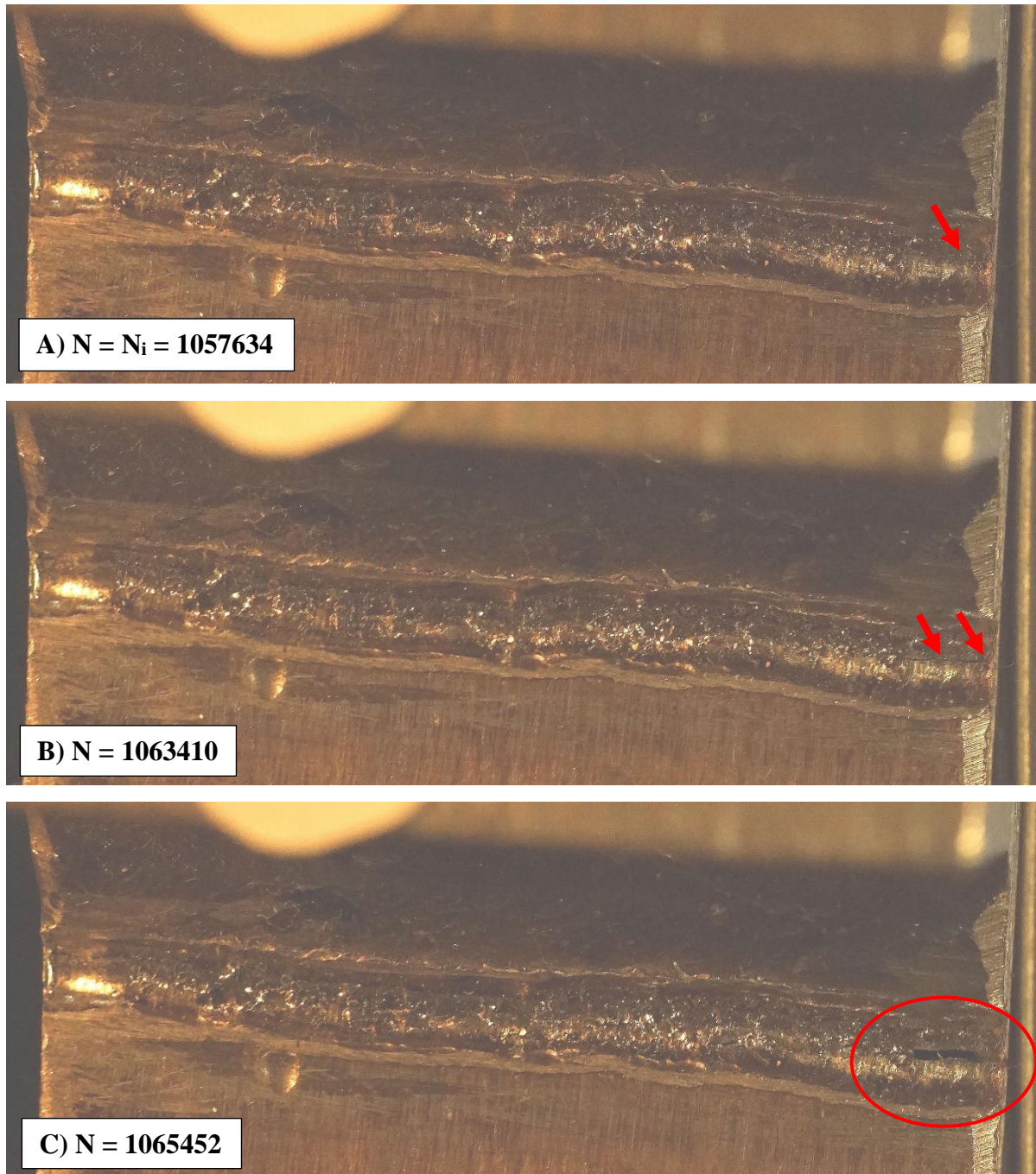
Slika 5.56 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-TA-HFMI-02 u različitim fazama njegova životnoga vijeka. Na fotografiji 5.56 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.56 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 309481$, dok slika 5.56 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.56. Pukotina na rubu zavora detalja S355-TA-HFMI-02

Prema analizi fotografija za detalj S355-TA-HFMI-02, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 298400$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

Slika 5.57 prikazuje fotografije pukotine na rubu zavora detalja S355-TA-HFMI-03 u različitim fazama njega životnoga vijeka. Na fotografiji 5.57 a) je označeno mjesto gdje je pukotina prvi puta uočena. Slika 5.57 b) pokazuje djelomično proširenu pukotinu na rubu zavora pri $N = 1063410$, dok slika 5.57 c) prikazuje pukotinu neposredno prije loma detalja.



Slika 5.57. Pukotina na rubu zavora detalja S355-TA-HFMI-03

Prema analizi fotografija za detalj S355-TA-HFMI-03, period nastanka tehničke pukotine završava pri $N_i = 1057634$ ciklusa, kada počinje njezino širenje sve do otkazivanja.

U tablici 5.21 prikazani su procijenjeni periodi nastanka i širenja tehničke pukotine prema analizi fotografija te njihovi udjeli u ukupnom životnom vijeku zavarenih detalja.

Tablica 5.21. *Periodi nastanka i širenja pukotine prema analizi fotografija rubova zavara*

Oznaka uzorka	N_i	N_p	N_F	N_i/N_F [%]	N_p/N_F [%]
S355-LA-AW-03	225390	30.754	256.144	88,0	12,0
S355-LA-HFMI-01	2566282	26.926	2.593.208	99,0	1,0
S355-LA-HFMI-05	773588	3.042	776.630	99,6	0,4
S355-TA-AW-02	124992	11.926	136.918	91,3	8,7
S355-TA-AW-03	98074	9.442	107.516	91,2	8,8
S355-TA-AW-04	102308	40.929	143.237	71,4	28,6
S355-TA-HFMI-02	298400	14.328	312.728	95,4	4,6
S355-TA-HFMI-03	1057634	7.946	1.065.580	99,3	0,7

Tablica 5.22 prikazuje usporedbu procijenjenih vrijednosti nastanka i širenja tehničke pukotine pomoću čeljusti preše i pomoću analize fotografija ruba zavara.

Tablica 5.22. *Usporedba perioda nastanka i širenja pukotine prema analizi fotografija rubova zavara*

Oznaka uzorka	N_i (čeljusti)	N_i (fotografije)	ΔN	$\Delta N/N_F$ [%]
S355-LA-AW-03	218001	225390	8390	2,88
S355-LA-HFMI-01	2567001	2566282	719	0,03
S355-LA-HFMI-05	768001	767978	23	0,72
S355-TA-AW-02	123000	124992	1992	1,45
S355-TA-AW-03	95001	98074	3073	2,86
S355-TA-AW-04	102000	102308	308	0,22
S355-TA-HFMI-02	296000	298400	2400	0,77
S355-TA-HFMI-03	1056001	1057634	1633	0,15

Usporedba rezultata iz tablice 5.22 pokazuje zadovoljavajuće poklapanje rezultata analize fotografija sa usvojenom metodom procjene pomoću pomaka čeljusti preše. Dakle, analizom snimljenih fotografija se može zaključiti da ranije predložena metoda pomoću pomaka čeljusti hidrauličke preše može s dovoljnom preciznošću procijeniti period nastanka pukotine.

Prosječne vrijednosti udjela perioda nastanka i perioda širenja pukotine u ukupnom životnom vijeku detalja određene na temelju pomaka čeljusti preše, prikazane su tablicom 5.23.

Tablica 5.23. Udjeli perioda nastanka i širenja pukotine u ukupnom životnom vijeku detalja

Tip detalja	N_i/N_F [%]	N_p/N_F [%]
S355 - LA - AW	74,7	25,3
S355 - LA - HFMI	99,0	1,0
S355 - TA - AW	86,4	13,6
S355 - TA - HFMI	97,7	2,3

Analizom pomaka čeljusti utvrđeno je da je udio perioda nastanka tehničke pukotine u ukupnom životnom vijeku zavarenog detalja u AW stanju veći kod TA detalja (prosječno 86,4%) u odnosu na LA detalje (prosječno 74,7%). Ukoliko se promatra HFMI obrađeno stanje, primjećuje se značajno povećanje perioda nastanka pukotine kod obje vrste zavarenih detalja. Udjeli perioda nastanka tehničke pukotine u HFMI obrađenom stanju su približni kod obje vrste detalja i iznose 99,0% za LA detalje te 97,7% za TA detalje. Procijenjeni periodi nastanka i širenja pukotine su korišteni u nastavku prilikom kalibracije TSM modela.

5.11 Zaključak

Ovo poglavlje opisuje izradu, HFMI obradu i laboratorijska ispitivanja AW i HFMI zavarenih LA i TA detalja, izrađenih od čelika kvalitete S355J2+N te S690QL. Kako bi se precizno utvrdili svi geometrijski parametri kontrole kvalitete, provedeno je 3D skeniranje uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N, a dobiveni modeli osim za kontrolu kvalitete su u daljnjoj fazi istraživanja korišteni i kao podloga za izradu geometrije za numeričke proračune faktora koncentracije naprezanja. Naknadnim mjerenjem parametara kontrole kvalitete na 3D skeniranim modelima utvrđeno je da je dubina žlijeba na strani osnovne ploče najujednačenija vrijednost, što ukazuje da je ovaj parametar prikladan pokazatelj učinka HFMI obrade.

Kako bi se dobile potrebne mehaničke karakteristike materijala, provedeno je vlačno ispitivanje epruveta izrađenih od ploča iz kojih su izrađeni i ispitni uzorci. Tvrdća na rubu zavora AW i HFMI obrađenih detalja mjerena je prijenosnim tvrdomjerom. Rezultati ispitivanja pokazuju da HFMI metoda značajno povećava tvrdoću na mjestu obrade, a samim time i lokalnu vlačnu čvrstoću na rubu zavora. Prosječno povećanje tvrdoće na mjestu HFMI obrade iznosi oko 38% za detalje izrađene od čelika S355J2+N i oko 61% za detalje izrađene od čelika S690QL. Također, kod detalja izrađenih od čelika S690QL uočena je veća raspršenost podataka. Dakle, zaključuje se da je kod čelika veće vlačne čvrstoće veće i povećanje tvrdoće na rubu zavora, što kao jedan od HFMI parametara poboljšanja utječe i na životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru.

Zaostala naprezanja na rubu zavora detalja izrađenih od S355J2+N i S690QL su mjerena metodom rendgenske difrakcije. Vrijednosti zaostalih naprezanja na HFMI obrađenim rubovima zavora značajno su niže u usporedbi s AW rubovima zavora, što ukazuje na to da su HFMI obradom unesena značajna zaostala tlačna naprezanja koja umanjuju vlačna naprezanja nastala procesom zavarivanja. Smanjenje zaostalih naprezanja uočeno je i kod detalja od čelika S355J2+N i čelika S690QL, međutim, negativna zaostala naprezanja izraženija su kod detalja izrađenih od S690QL, koji imaju veću vlačnu čvrstoću. Dakle, zaključuje se da čelik veće vlačne čvrstoće ima veća tlačna zaostala naprezanja nakon HFMI obrade, što utječe na dodatno povećanje životnog vijeka kod čelika visoke čvrstoće.

Nadalje, provedena su opsežna ciklička ispitivanja navedenih uzoraka pri konstantnim amplitudama sve do njihova otkazivanja. Rezultati cikličkih ispitivanja ukazuju na značajno

povećanje životnoga vijeka HFMI obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru. Rezultati također pokazuju da su TA detalji povoljniji za produljenje životnog vijeka od LA detalja. Iako su uzorci i zavari izvedeni što je moguće sličnije, a ispitivanje provedeno u laboratorijskim (identičnim) uvjetima, uočava se značajno raspršenje u rezultatima. HFMI obrađeni detalji pokazuju veće raspršenje životnoga vijeka u odnosu na AW detalje. Ovo nastaje zbog različitih materijalnih i geometrijskih svojstava koji utječu na životni vijek kod umora.

Također su prikazane i analizirane karakteristične plohe loma uzoraka izrađenih od čelika S355J2+N. Kod LA detalja pukotine obično nastaju u AW stanju u sredini uzorka, dok u slučaju HFMI tretiranih uzoraka mjesto nastanka pukotine ima određeni pomak prema krajevima ploče u odnosu na sredinu uzorka. U slučaju TA-AW uzoraka, uočava se više točaka nastanka pukotine na vrhu zavara, duž linije zavara, dok se za HFMI tretirano stanje početne pukotine uočavaju u blizini rubova uzoraka.

Kako bi se odredio kraj perioda nastanka i početak perioda širenja pukotine, provedena je analiza maksimalnih pomaka čeljusti preše prilikom cikličkih ispitivanja detalja, gdje je usvojena metoda procjene perioda nastanka i širenja tehničke pukotine. Navedena pretpostavka je potvrđena analizom fotografija ruba zavara koje su snimane tijekom ispitivanja. Pokazano je da kod LA-AW detalja period nastanka pukotine iznosi prosječno 74,7% od ukupnoga životnoga vijeka, a kod LA-HFMI detalja udio perioda nastanka tehničke pukotine iznosi 99,0% ukupnoga životnoga vijeka. U slučaju TA-AW detalja, period nastanka pukotine iznosi prosječno 86,4% od ukupnog životnoga vijeka, a u slučaju TA-HFMI detalja, prosječni udio perioda nastanka pukotine iznosi 97,7% od ukupnoga životnoga vijeka detalja. Može se zaključiti se da HFMI metoda ima značajan utjecaj na produljenje perioda nastanka pukotine.

Navedeni rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjima, koriste se za kalibraciju determinističkoga TSM modela, a potom i stohastičkoga TSM modela za procjenu životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih čeličnih detalja izloženih cikličkom opterećenju s konstantnim amplitudama.

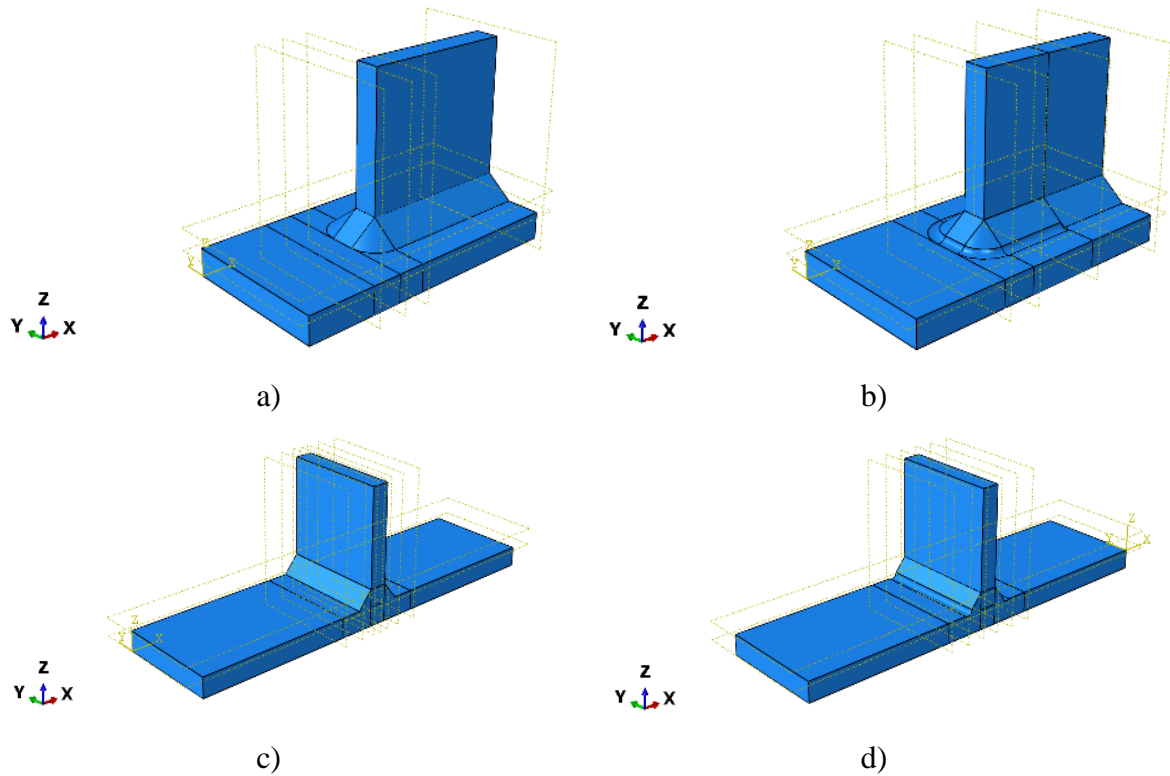
6 KALIBRACIJA DETERMINISTIČKOGA PRORAČUNSKOGA MODELA

6.1 Uvod

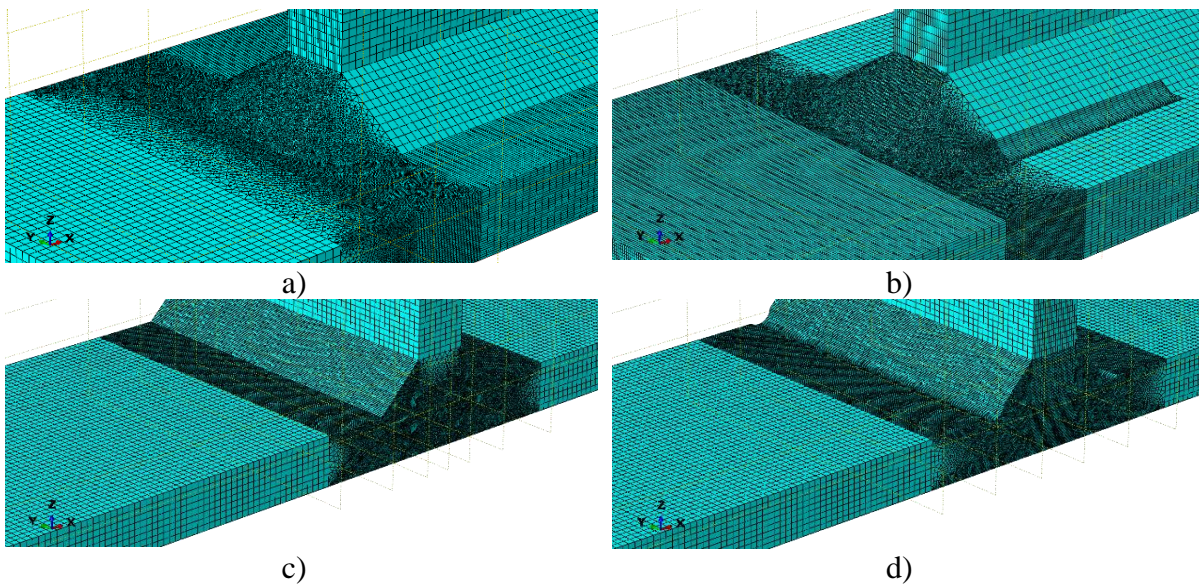
U ovom poglavlju prikazana je kalibracija determinističkoga TSM proračunskoga modela za procjenu životnoga vijeka AW i HFMI poboljšanih LA i TA zavarenih detalja izloženih umoru. Razvoj i parametarska analiza modela prikazani su u Poglavlju 4. Za precizniju kalibraciju prikazanu ovim poglavljem, provedena su laboratorijska ispitivanja detalja opisana u Poglavlju 5., na temelju kojih su određeni geometrijski, materijalni i HFMI parametri poboljšanja te njihov ukupni životni vijek kod umora. Navedeni parametri služe kao ulazni podatci za kalibrirani deterministički TSM model, a rezultati proračuna su potvrđeni rezultatima provedenih cikličkih ispitivanja. Potom je provedena statistička analiza gdje su metodom linearne regresije određene kategorije pojedinih detalja kao karakteristične otpornosti na umor pri $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusa ($S_{C,95\%}$). Na kraju je procijenjen i stupanj povećanja životnoga vijeka HFMI obrađenih detalja u odnosu na AW detalje.

6.2 Određivanje faktora koncentracije naprezanja

Faktor koncentracije naprezanja, K_t , proračunat je linearnom statičkom analizom pomoću metode konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus/CAE software [211]. Idealizirana geometrija promatranih detalja je dobivena na temelju stvarne geometrije. Geometrija modela je izrađena na temelju srednjih vrijednosti izmjerene geometrije modela dobivenih 3D skeniranjem, kako je prikazano u Poglavlju 5. U slučaju LA-AW i TA-AW detalja, rub zavara je modeliran bez dodatnog radijusa, dok se u slučaju HFMI obrađenih detalja za modeliranje HFMI žlijeba koristi radijus u iznosu od 2,0 mm [65]. Geometrija numeričkih modela je prikazana na slici 6.1. Gustoća mreže konačnih elemenata je optimizirana na približno globalnu veličinu od 0,2 mm u području oko rubova zavara. U ostatku modela, približna globalna gustoća mreže je 1 mm, kao što je prikazano na slici 6.2. Isti princip diskretizacije modela koristi se i za AW i za HFMI obrađene detalje. Za diskretizaciju numeričkih modela korištena je kombinacija linearnog trokutastog prizmatičnog oblika sa 6 čvorova (C3D6), *linear brick* s 8 čvorova, *reduced integration, hourglass control* (C3D8R) i kvadratnog tetraedra s 10 čvorova (C3D10).



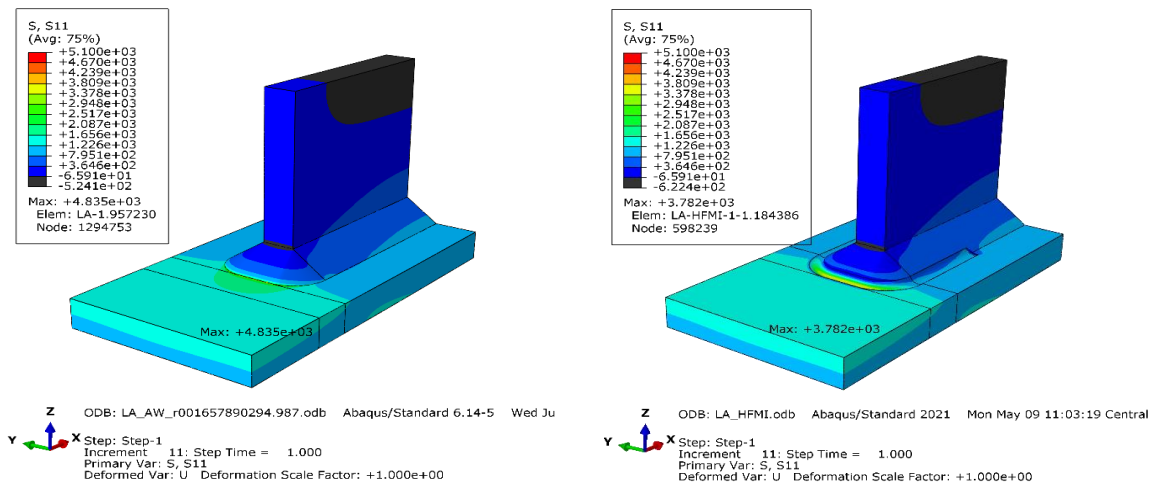
Slika 6.1. Geometrija numeričkih modela: a) LA-AW, b) LA-HFMI, c) TA-AW, d) TA-HFMI



Slika 6.2. Prikaz mreže numeričkih modela: a) LA-AW, b) LA-HFMI, c) TA-AW, d) TA-HFMI

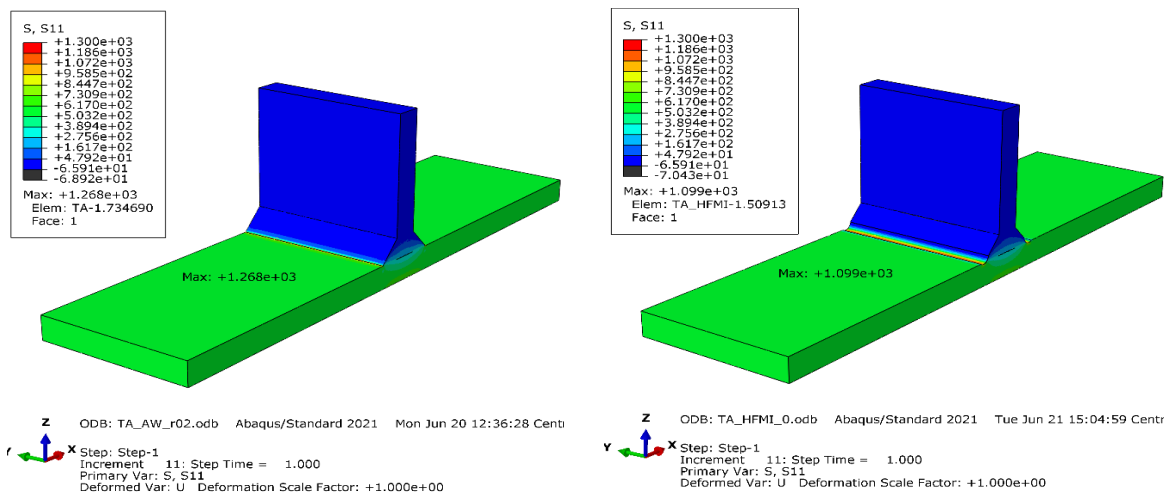
Provedene linearne analize s uvedenim pomakom od 0,5 mm na krajnjem osloncu osnovne ploče rezultiraju raspodjelom naprezanja u detaljima LA i TA kao što je prikazano na slici 6.3, odnosno 6.4. U slučaju LA detalja, korištena je simetrija u numeričkom modelu, dok je TA detalj modeliran u potpunosti, što rezultira višim naprezanjima u LA detalju u odnosu na TA detalj. Kao što je prikazano na slici 6.3 (lijevo) za LA-AW detalj, uvedeni pomak rezultira

najvećim glavnim naprezanjem od 4835,0 MPa. Za ovaj detalj izračunato prosječno naprezanje na temeljnoj ploči iznosi 1450,0 MPa. Dijeljenjem maksimalnog s minimalnim naprezanjem, faktor koncentracije naprezanja za ovaj detalj iznosi $K_t = 4835,0/1453,0 = 3,33$. Analogno tome, za LA-HFMI prikazan na slici slici 6.3 (desno), faktor koncentracije naprezanja iznosi $K_t = 3782,0/1435,0 = 2,64$.



Slika 6.3. Raspodjela naprezanja u LA detalju: AW(lijevo), HFMI (desno)

Slika 6.4 (lijevo) prikazuje rezultate za TA-AW model. Maksimalno izračunato glavno naprezanje je 1268,0 MPa s minimalnim glavnim naprezanjem na osnovnoj ploči od 571,0 MPa. Ova naprezanja rezultiraju faktorom koncentracije naprezanja $K_t = 1268,0/571,0 = 2,25$. Analogno za TA-HFMI prikazan na slici 6.4 (desno), faktor koncentracije naprezanja iznosi $K_t = 1099,0/566,0 = 1,94$.



Slika 6.4. Raspodjela naprezanja u TA detalju: AW (lijevo), HFMI (desno)

6.3 Kalibracija i primjena determinističkoga modela

Proračun je proveden za AW i HFMI obrađene LA i TA detalje izrađene od čelika S355J2+N te S690QL. Usvojeni geometrijski i materijalni parametri za NS pristup i mehaniku loma su izmjereni i definirani ranije te su u ovom poglavlju sintetizirani u tablicama 6.1 i 6.4. Za proračun perioda nastanka pukotine, usvajaju se srednje vrijednosti izmjerenih mehaničkih parametara i Brinell-ove tvrdoće. Što se tiče zaostalih naprezanja, u slučaju LA detalja, usvojene su srednje vrijednosti točke 1 (slika 5.23), jer je točka 1 najbliža mjestu početka pukotine. U slučaju TA usvojene su srednje vrijednosti izmjerenih zaostalih naprezanja za točke 2 i 3. Ciklički materijalni parametri za NS pristup definirani su prema HM opisanoj ranije te su prikazani u tablicama 6.1 i 6.4.

6.3.1 Proračun životnog vijeka detalja izrađenih od čelika S355J2+N

Usvojeni geometrijski i materijalni parametri za proračun životnog vijeka LA i TA detalja izrađenih od čelika kvalitete S355J2+N, prikazani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Usvojeni parametri za TSM model – detalji S355J2+N

	Parametar	S355-LA-AW	S355-LA-HFMI	S355-TA-AW	S355-TA-HFMI
NS pristup	f_y [MPa]	450,3	450,3	450,3	450,3
	f_u [MPa]	575,5	575,5	575,5	575,5
	E [MPa]	210000	210000	210000	210000
	σ_{res} [MPa]	103,3	-37,7	26,0	-144,0
	HB	161	222	161	222
	K_t [MPa]	3,33	2,64	2,25	1,94
	K'	894,27	1233,0990	894,2745	1233,0990
	n'	0,15	0,0150	0,1500	0,0150
	σ'_f [MPa]	909,25	1168,5000	909,2500	1168,5000
	ε'_f	0,5757	0,4698	0,5757	0,4698
	b	-0,0900	-0,0750	-0,1110	-0,1200
	c	-0,9000	-0,6500	-1,0200	-0,8000
Mehanika loma	C	$5 \cdot 10^{-12}$			
	m	3,0			
	a_i [m]	0,0005			
	a_f [m]	0,005			
	T [m]	0,008			
	Y(a)	1,2			

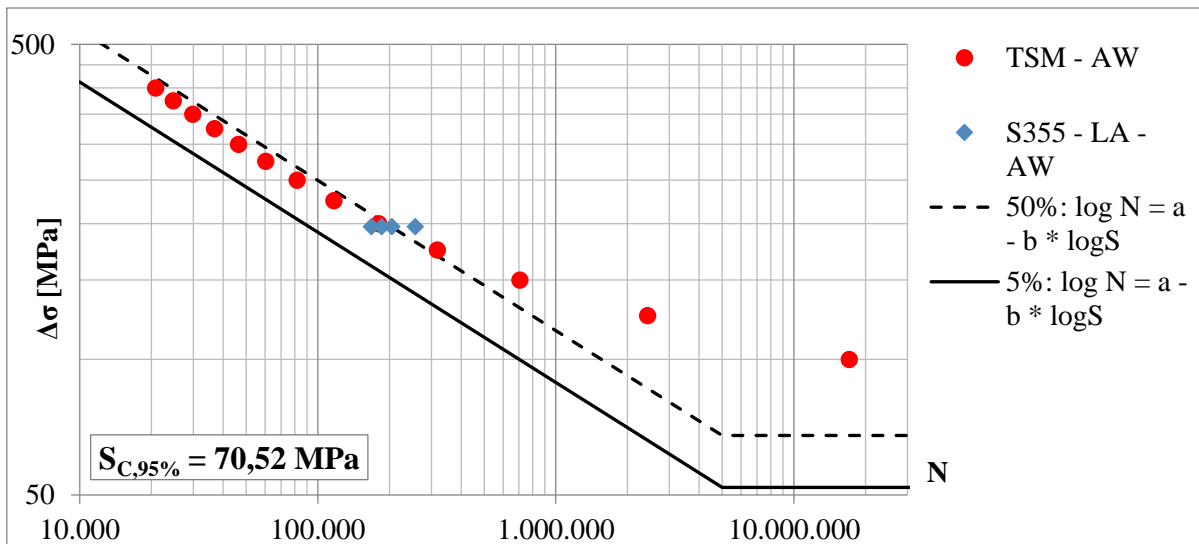
U parametarskoj analizi u Poglavlju 4, pretpostavljene vrijednosti zaostalog naprezanja za LA-AW su između 25 MPa i 250 MPa, a za detalje LA-HFMI između -350 MPa i -200 MPa. Kao

što je prikazano u tablici 11, izmjerena prosječna vrijednost zaostalog naprezanja za S355-LA-AW iznosi 103,3 MPa, dok za S355-LA-HFMI iznosi -37,7 MPa. Može se zaključiti da AW stanje odgovara pretpostavljenom rasponu, što nije slučaj za izmjereno HFMI zaostalo naprezanje.

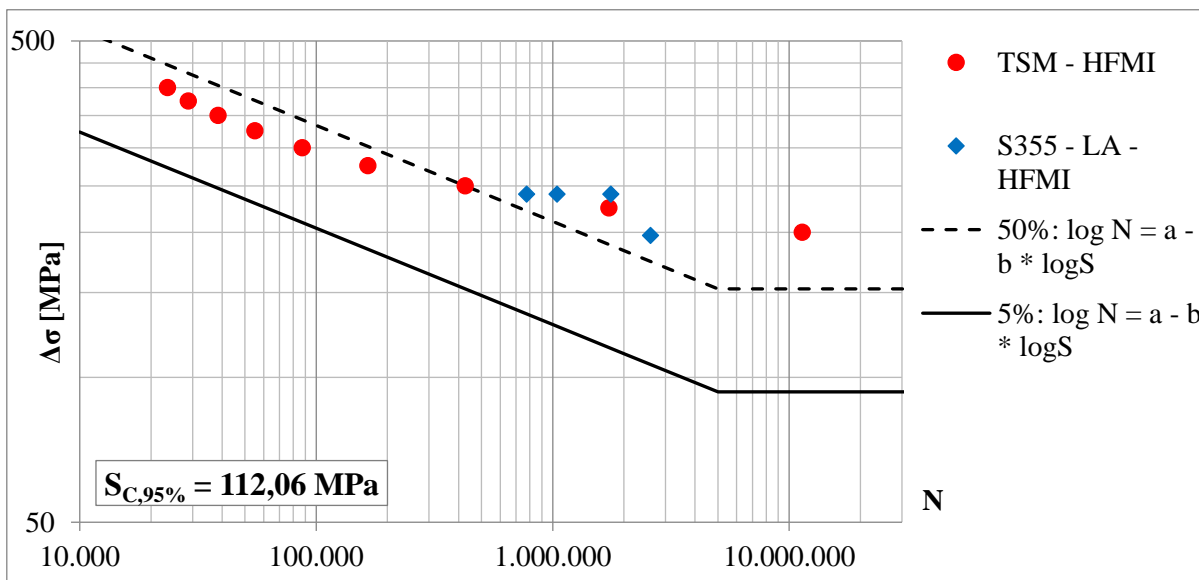
Rezultati proračuna su prikazani u tablicama 6.2 i 6.3 te na slikama 6.5 – 6.8. Provedena je statistička analiza rezultata TSM modela u kombinaciji s rezultatima cikličkih ispitivanja. Statistička analiza se odnosi na linearnu regresiju s fiksnim nagibom od $m = 3$ za AW detalje i $m = 5$ za HFMI detalje, kako je opisano u Poglavlju 3. Procijenjena je karakteristična otpornost na umor pri $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusa ($S_{C,95\%}$) [162]. Tablica 6.2 prikazuje proračunate periode nastanka i širenja pukotine za LA detalje. Ukupni životni vjekovi LA detalja s pripadajućim rezultatima cikličkih ispitivanja iz Poglavlja 5 prikazani su slikama 6.5 i 6.6. Dvije linije u dijagramima na slikama predstavljaju regresijske linije dobivene statističkom analizom.

Tablica 6.2. Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S355J2+N) – TSM model

$\Delta\sigma$	Period nastanka pukotine, N_i		Period širenja pukotine, N_P
	$N_{i,AW}$	$N_{i,HFMI}$	
75	324.839.195	73.290.402.517.651	1.850.599
100	16.271.888	954.800.978.668	780.719
125	2.031.417	28.858.362.221	399.741
150	474.865	1.478.432.384	231.321
175	171.571	109.999.317	145.672
200	82.742	11.263.791	97.595
225	48.198	1.657.231	68.541
250	31.838	376.061	49.968
275	22.929	127.786	37.534
300	17.559	58.235	28.913
325	14.065	32.178	22.743
350	11.654	20.191	18.208
375	9.913	13.988	14.808
400	8.608	11.244	12.204



Slika 6.5. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S355-LA-AW

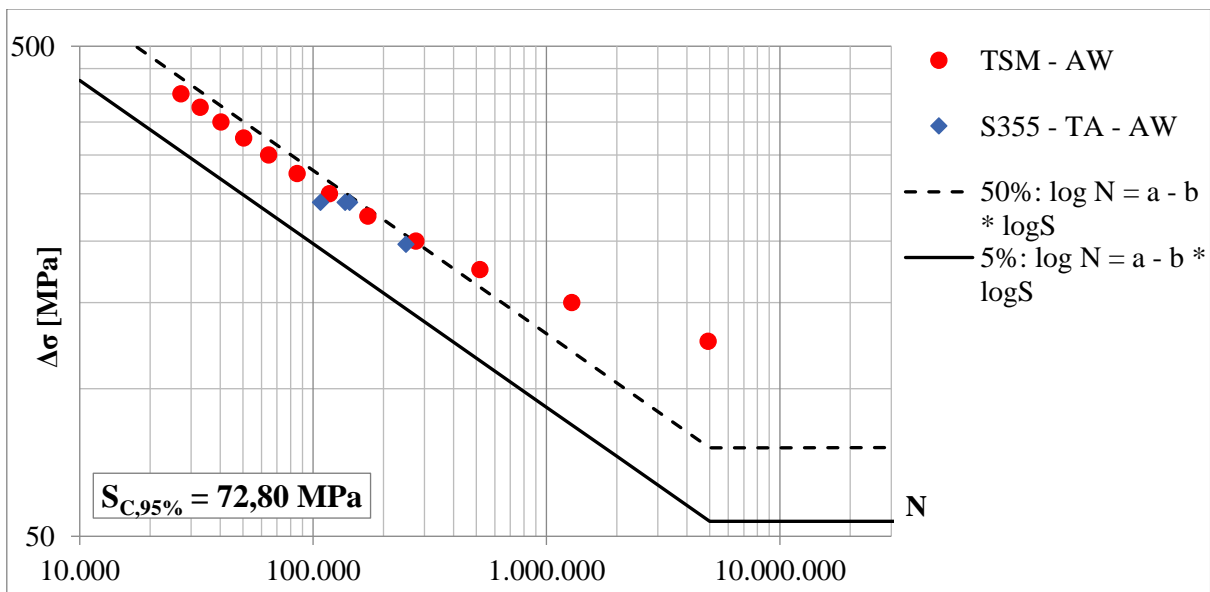


Slika 6.6. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S355-LA-HFMI

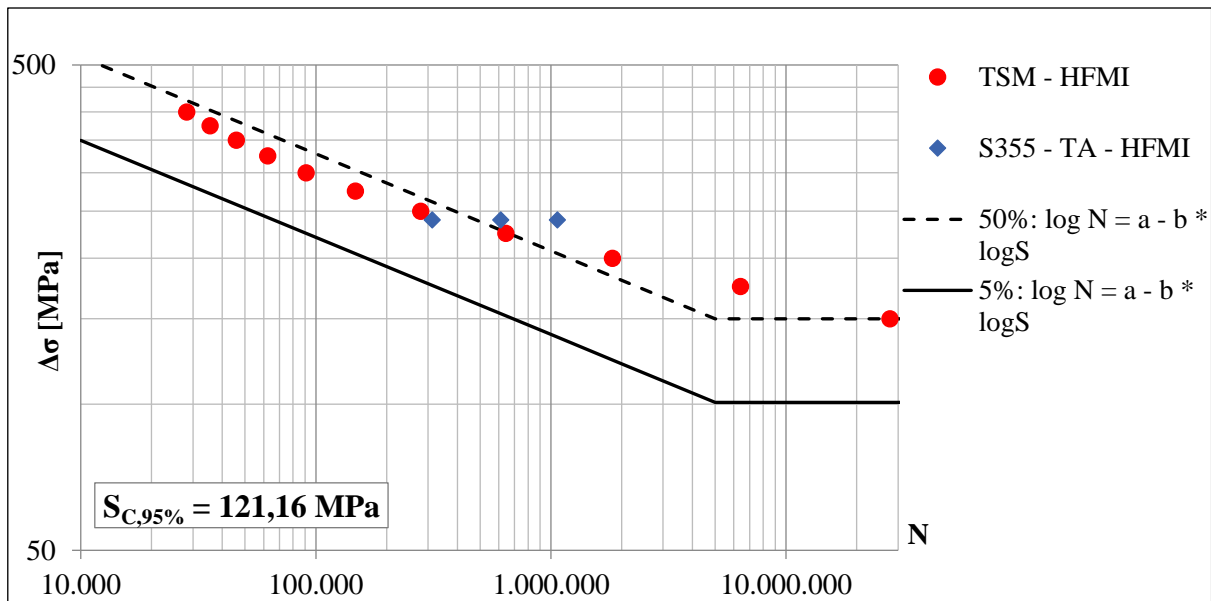
Tablica 6.3 prikazuje proračunate periode nastanka i širenja pukotine za TA detalje. Ukupni životni vijekovi TA detalja s pripadajućim rezultatima cikličkih ispitivanja iz Poglavlja 5 prikazani su slikama 6.7 i 6.8.

Tablica 6.3. Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S355J2+N) – TSM model

$\Delta\sigma$	Period nastanka pukotine, N_i		Period širenja pukotine, N_P
	$N_{i,AW}$	$N_{i,HFMI}$	
75	268.880.439	45.621.591.203	3.364.641
100	18.132.425	3.021.444.229	1.419.458
125	2.468.920	349.078.605	726.775
150	539.675	57.297.850	420.575
175	166.870	12.002.211	264.853
200	67.679	3.020.767	177.435
225	34.006	885.330	124.617
250	20.118	298.706	90.848
275	13.418	116.127	68.250
300	9.758	52.138	52.573
325	7.553	26.836	41.353
350	6.120	15.558	33.105
375	5.131	9.933	26.913
400	4.415	6.839	22.179



Slika 6.7. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S355-TA-AW



Slika 6.8. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S355-TA-HFMI

Procijenjena karakteristična otpornost na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa za S355-LA-AW detalj je $S_{C,95\%} = 70,52 \text{ MPa}$, a za S355-LA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 112,06 \text{ MPa}$. Procijenjena karakteristična čvrstoća na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa za S355-TA-AW detalj je $S_{C,95\%} = 72,80 \text{ MPa}$, a za S355-TA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 121,16 \text{ MPa}$.

6.3.2 Proračun životnog vijeka detalja izrađenih od čelika S690QL

Usvojeni geometrijski i materijalni parametri za proračun životnog vijeka LA i TA detalja izrađenih od čelika kvalitete S690QL, prikazani su u tablici 6.4.

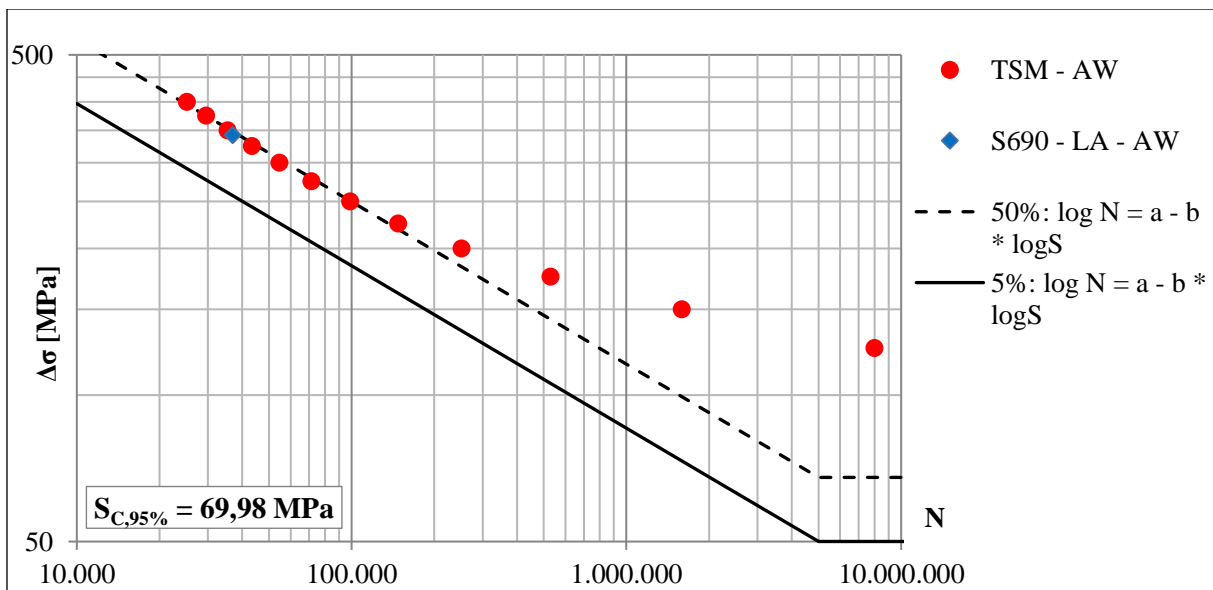
Tablica 6.4. Usvojeni parametri za TSM model – detalji S690QL

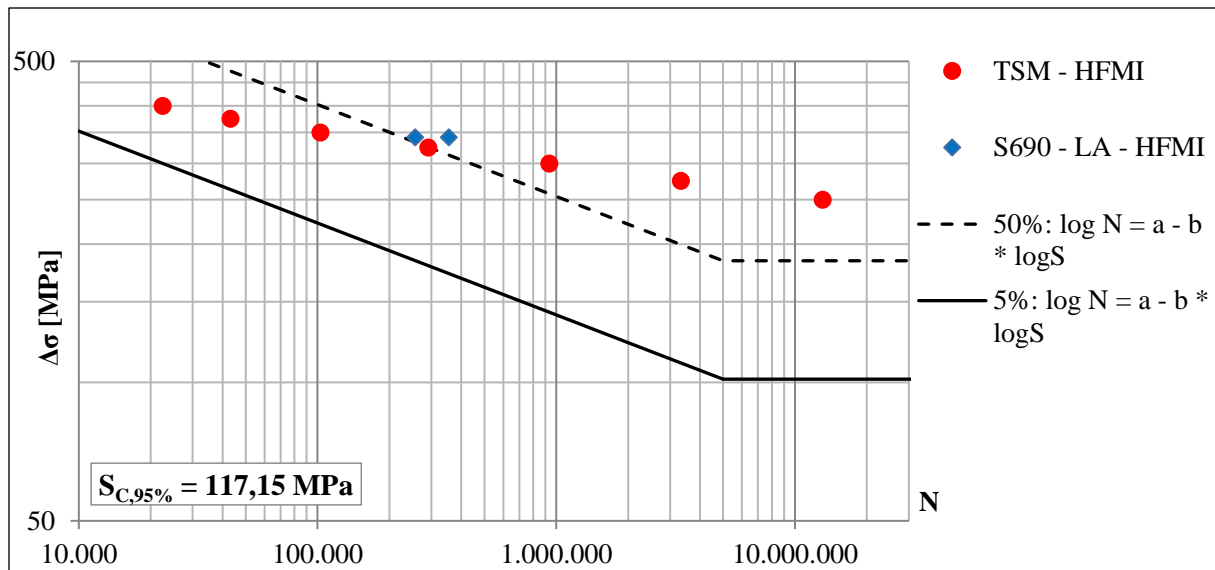
	Parametar	S690-LA-AW	S690-LA-HFMI	S690-TA-AW	S690-TA-HFMI
NS pristup	f_y [MPa]	824,7	824,7	824,7	824,7
	f_u [MPa]	867,3	867,3	867,3	867,3
	E [MPa]	210000	210000	210000	210000
	σ_{res} [MPa]	121,4	-238,33	-70,83	-166,6
	HB	202	325	202	325
	K_t [MPa]	3,33	2,64	2,25	1,94
	K'	1122,0090	1805,2125	1122,0090	1805,2125
	n'	0,15	0,0150	0,1500	0,0150
	σ_f' [MPa]	1083,5000	1606,2500	1083,5000	1606,2500
	ε_f'	0,5033	0,3168	0,5033	0,3168
	b	-0,0900	-0,0900	-0,1400	-0,1180
	c	-0,7700	-0,9000	-1,0000	-0,9500
Mehanika loma	C	$6 \cdot 10^{-12}$			
	m	3,0			
	a_i [m]	0,0005			
	a_f [m]	0,005			
	T [m]	0,008			
	Y(a)	1,2			

Rezultati proračuna su prikazani su u tablicama 6.5 i 6.6 te na slikama 6.9 – 6.12. Kao i u slučaju S355J2+N detalja, provedena je statistička analiza rezultata TSM modela u kombinaciji s rezultatima cikličkih ispitivanja. Tablica 6.5 prikazuje proračunate periode nastanka i širenja pukotine za LA detalje. Ukupni životni vjekovi LA detalja s pripadajućim rezultatima cikličkih ispitivanja iz Poglavlja 5 prikazani su slikama 6.9 i 6.10.

Tablica 6.5. Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S690QL) – TSM model

$\Delta\sigma$	Period nastanka pukotine, N_i		Period širenja pukotine, N_P
	$N_{i,AW}$	$N_{i,HFMI}$	
75	1915330903	48178786602100	1542168
100	77402480	1923809736249	650604
125	7644339	123121192313	333116
150	1396084	12319149673	192763
175	407544	1674150873	121398
200	169513	283939830	81324
225	90457	56927295	57117
250	57001	13000784	41637
275	40120	3295200	31283
300	30418	910792	24096
325	24294	271685	18955
350	20146	87484	15182
375	17181	30839	12346
400	14970	12237	1016

**Slika 6.9.** Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-LA-AW

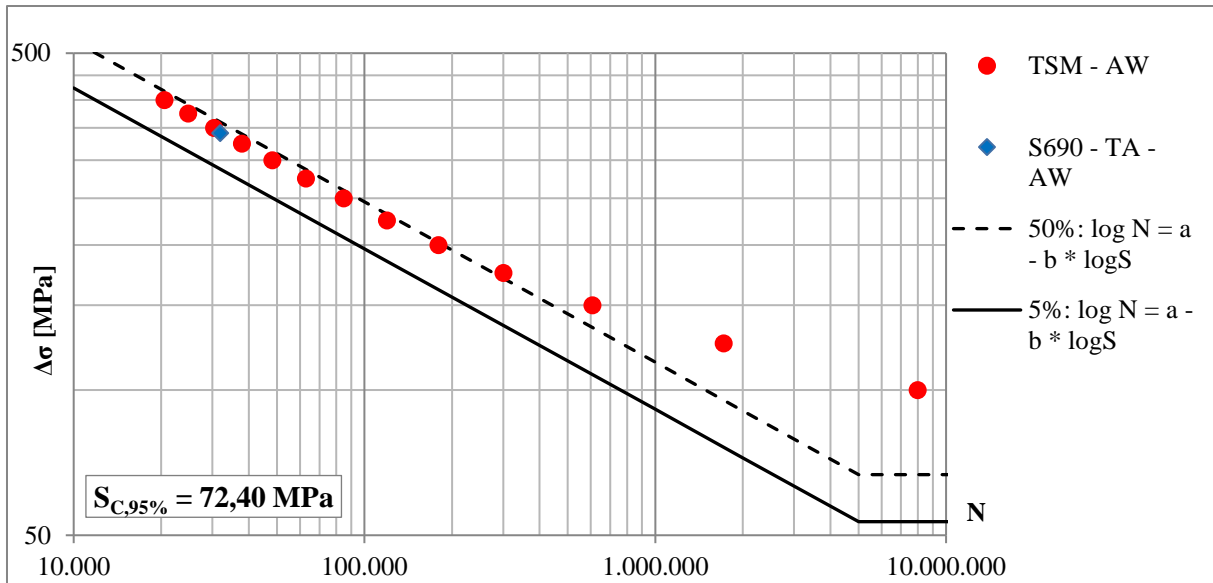


Slika 6.10. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-LA-HFMI

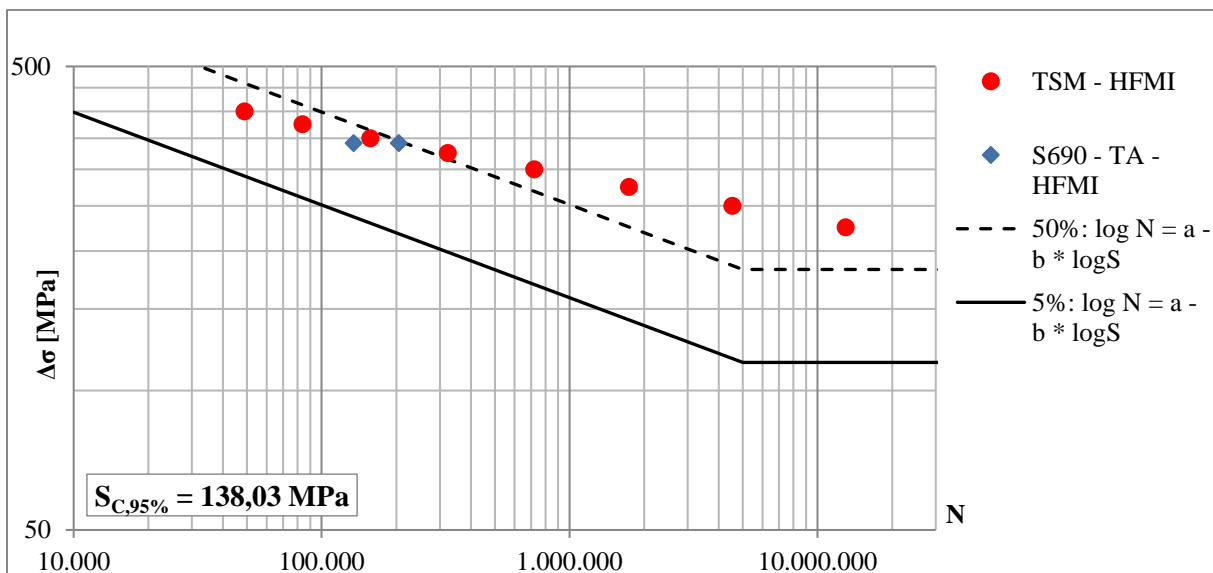
Tablica 6.6 prikazuje proračunate periode nastanka i širenja pukotine za LA detalje. Ukupni životni vjekovi LA detalja s pripadajućim rezultatima cikličkih ispitivanja iz Poglavlja 5 prikazani su slikama 6.11 i 6.12.

Tablica 6.6. Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S690QL) – TSM model

$\Delta\sigma$	Crack initiation period, N_i		Crack propagation period, N_p
	$N_{i,AW}$	$N_{i,HFMI}$	
75	66.848.660	223.606.282.910	2.803.860
100	6.788.731	18.422.452.663	1.182.884
125	1.109.430	2.467.897.829	605.646
150	256.263	463.283.623	350.476
175	79.455	109.680.834	220.714
200	31.691	30.742.287	147.865
225	15.568	9.796.737	103.850
250	9.030	3.452.911	75.698
275	5.949	1.320.134	56.873
300	4.308	540.037	43.810
325	3.342	234.061	34.465
350	2.726	106.849	27.599
375	2.307	51.241	22.434
400	2.007	25.838	18.480



Slika 6.11. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-TA-AW



Slika 6.12. Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-TA-HFMI

Procijenjena karakteristična otpornost na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa za S690-LA-AW detalj je $S_{C,95\%} = 67,89$ MPa, a za S690-LA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 112,06$ MPa. Procijenjena karakteristična čvrstoća na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa za S690-TA-AW detalj je $S_{C,95\%} = 72,4$ MPa, a za S690-TA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 138,03$ MPa.

6.3.3 Rekapitulacija rezultata proračuna determinističkoga modela

Tablica 6.7 pokazuje rekapitulaciju karakterističnih otpornosti na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa te stupanj povećanja životnog vijeka HFMI obrađenih detalja u odnosu na AW detalje.

Tablica 6.7. Rekapitulacija proračunatih otpornosti na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa ($S_{C,95\%}$)

R.br.	Detalj	$S_{C,95\%}$ (AW) [MPa]	$S_{C,95\%}$ (HFMI) [MPa]	$S_{C,95\%}$ (HFMI) / $S_{C,95\%}$ (AW)
1.	S355-LA	70,52	112,06	1,59
2.	S355-TA	72,80	121,16	1,66
3.	S690-LA	69,98	117,15	1,67
4.	S690-TA	72,40	138,03	1,91

U slučaju detalja izrađenih od čelika S355J2+N, koeficijent povećanja otpornosti za LA-HFMI detalje u odnosu na LA-AW detalje iznosi 1,59. Koeficijent povećanja otpornosti za TA-HFMI u odnosu na TA-AW iznosi 1,66. Ovi rezultati su približno u skladu s literaturom [15], gdje je navedeno da je najveća kategorija koja se može ostvariti za čelike niže čvrstoće ($\leq S355$) najbliža kategoriji FAT klase dobivene kada se AW-FAT klasa pomnoži s koeficijentom 1,6. Međutim, u slučaju detalja izrađenih od čelika S690QL, koeficijent povećanja otpornosti su nešto veći. Za LA-HFMI detalje u odnosu na LA-AW detalje iznosi 1,67, dok koeficijent povećanja otpornosti za TA-HFMI u odnosu na TA-AW iznosi 1,91.

6.4 Zaključak

Na temelju svih dosadašnjih saznanja, u ovom poglavlju su provedeni numerički proračuni faktora koncentracije naprezanja metodom konačnih elemenata te kalibracija TSM modela za laboratorijski ispitane LA i TA detalje izrađene od čelika kvalitete S355J2+N te S690QL. Za izračun koncentracije naprezanja prije i nakon HFMI tretmana korištena je stvarna geometrija za pregled i definiranje idealizirane geometrije u Abaqusu/CAE. S obzirom na prikazane rezultate može se zaključiti da TA detalji imaju nižu koncentraciju naprezanja od LA detalja. Rezultati proračuna ukazuju i na to da se HFMI obradom značajno smanjuje faktor koncentracije naprezanja na rubu zavara. Faktor koncentracije naprezanja kod LA detalja u AW stanju iznosi $K_{t,LA-AW} = 3,33$, dok u HFMI obrađenom stanju $K_{t,LA-HFMI} = 2,64$. U slučaju TA detalja, faktor koncentracije naprezanja u AW stanju iznosi $K_{t,TA-AW} = 2,25$, dok u HFMI obrađenom stanju $K_{t,TA-HFMI} = 1,94$.

Nadalje, pokazano je da se rezultati proračuna kalibriranog TSM modela dobro slažu s rezultatima cikličkih ispitivanja promatranih AW i HFMI obrađenih detalja, čime je potvrđena prva hipoteza (H1), odnosno, da je kombinacijom metoda koje obuhvaćaju period nastanka i širenja pukotine kod umora moguće je razviti model koji će omogućiti izračun životnoga vijeka zavarenih detalja čeličnih konstrukcija obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom.

Iz prikazanih rezultata zaključuje se da je TA detalj povoljniji iz aspekta umora u odnosu na LA detalj. Rezultati pokazuju značajno povećanje ukupnog životnog vijeka HFMI detalja u usporedbi s AW detaljima. Prema rezultatima proračuna i cikličkih ispitivanja, zaključuje se da granica popuštanja materijala detalja u AW stanju nema značajan utjecaj na otpornost na umor, dok se kod HFMI obrađenih detalja uočava znatno povećanje otpornosti na umor kod detalja istog tipa. Ovo je vidljivo i iz prikazanih koeficijenata povećanja otpornosti koji za S355J2+N detalje iznose oko 1,59 – 1,66, dok u slučaju S690QL detalja ti koeficijenti iznose 1,88 – 1,91.

Rezultati dobiveni TSM modelom ne uzimaju u obzir sve geometrijske i materijalne neizvjesnosti, koje je moguće uzeti u obzir sa stohastičkim modelom. Stohastički model stoga pruža pouzdaniju procjenu vijeka trajanja od zamora razmatranih AW te HFMI obrađenih detalja.

7 STOHAŠTIČKI PRORAČUNSKI MODEL

7.1 Uvod

U svrhu dobivanja podataka potrebnih za kalibraciju determinističkoga TSM modela za proračun životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru, provedena su ciklička ispitivanja uzoraka na hidrauličkoj preši pri konstantnim amplitudama, kako je prikazano u Poglavlju 5. U Poglavlju 6 je potom provedena kalibracija TSM modela na temelju cikličkih ispitivanja zavarenih detalja i mjerenja HFMI parametara poboljšanja. Rezultati proračuna životnih vjekova pokazuju dobro slaganje s rezultatima ispitivanja. Nadalje, statističkom analizom rezultata dobivenih determinističkim TSM modelom te laboratorijskim ispitivanjima određene su karakteristične otpornosti detalja na umor te je procijenjen stupanj poboljšanja otpornosti na umor HFMI detalja u odnosu na AW detalje.

Ciklička ispitivanja su poprilično zahtjevna, dugotrajna i skupa. Primjerice, najdulje cikličko ispitivanje zaustavljeno je na 9000000 ciklusa. Pri frekvenciji od 17 Hz, ispitivanje je kontinuirano trajalo ukupno 147 sati za samo jedan uzorak. Kako bi se proširila saznanja dobivena na temelju ograničenog broja laboratorijskih ispitivanja, koristi se stohastički model pomoću kojega se generiraju „virtualna ispitivanja“ kalibrirana na manjem broju rezultata dobivenih „stvarnih“ laboratorijskih cikličkih ispitivanja. Simulacije ispitivanja za LA i TA detalje izložene promjenjivim naprezanjima konstantnih amplituda provedene su Monte Carlo simulacijom.

Monte Carlo simulacije uzimaju u obzir brojne nepouzdanosti na strani otpornosti poput nepouzdanosti faktora koncentracije naprezanja (geometrije), granice popuštanja, vlačne čvrstoće materijala, Brinell-ove tvrdoće materijala i zaostalih naprezanja na površini ruba zavora te geometrijskih i materijalnih parametara u proračunu širenja pukotine. Na taj način stohastički model omogućuje pouzdaniju procjenu životnog vijeka AW i HFMI obrađenih detalja izloženih umoru. Osim toga, stohastičkim modelom se spoznaje dobivene na ograničenom broju uzoraka mogu proširiti kako bi se dobila šira slika za više različitih razlika naprezanja te različite geometrije koja se u ovom slučaju u obzir uzima pomoću faktora koncentracije naprezanja, K_t .

Postoji nekoliko stohastičkih modela u literaturi koje obuhvaćaju i Monte Carlo simulaciju [212–215], ali navedeni modeli zanemaruju period nastanka pukotine pa u tom slučaju nisu primjenjivi kod procjene životnog vijeka zavarenih detalja obrađenih HFMI metodom. Stohastički model prikazan u [129] je proširen i na period nastanka pukotine te obuhvaća nastanak i širenje pukotine AW zavarenih detalja, međutim, ne odnosi se i na HFMI obrađene detalje.

U sklopu ovog istraživanja, prikazan je stohastički TSM model koji obuhvaća period nastanka i period širenja pukotine te je uz AW detalje u mogućnosti procijeniti i životni vijek HFMI obrađenih detalja izloženih umoru. Stohastički TSM model, poput determinističkoga, slijedi istu proceduru proračuna perioda nastanka i širenja pukotine kako je prikazano na dijagramu tijeka TSM modela u Poglavlju 6 (slika 6.6). Razlika je u tome što varijable kod stohastičkoga modela nisu determinističke, već se zadaju kao slučajne varijable (bazne varijable) s pripadajućim funkcijama raspodjele.

7.2 Monte Carlo simulacije

Osnovni princip Monte Carlo simulacije je pobliže opisan u Poglavlju 2. Za slučajno danu vrijednost razlike napreznja $\Delta\sigma$ i skupa geometrijskih i materijalnih parametara detalja s pripadajućim funkcijama raspodjele, proračunava se ukupni životni vijek promatranog detalja i rezultat se bilježi u S-N dijagramu. Isti postupak se ponavlja veliki broj puta. Stohastičkim modelom se istražuju sljedeća dva slučaja koja se temelje na 10000 simulacija [129]:

A) Simulacije cikličkih ispitivanja na hidrauličkoj preši uzoraka izrađenih od čelika kvalitete S355J2+N i S690QL – proširenje determinističkoga TSM modela na stohastičku razinu, odnosno, generiranje „virtualnih ispitivanja“ kalibriranih na stvarnim ispitivanjima.

B) Simulacije cikličkih ispitivanja na hidrauličkoj preši za širi raspon faktora koncentracije napreznja (geometrije), zadržavajući ostale bazne varijable svojstvene promatranim uzorcima izrađenima od čelika kvalitete S355J2+N i S690QL.

Slučaj A) sadrži ukupno 8 simulacija, dok slučaj B) sadrži ukupno 16 simulacija. Pregled provedenih Monte Carlo simulacija u sklopu ovog istraživanja prikazan je u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Pregled Monte Carlo simulacija

A) Simulacije ispitivanja promatranih detalja		B) Simulacije ispitivanja detalja za širi raspon faktora koncentracije naprezanja			
Br.	Detalj	Br.	Detalj	Br.	Detalj
1	S355-LA-AW	9	S355-LA-AW- $K_{t,min}$	17	S690-LA-AW- $K_{t,min}$
2	S355-LA-HFMI	10	S355-LA-AW- $K_{t,max}$	18	S690-LA-AW- $K_{t,max}$
3	S355-TA-AW	11	S355-LA-HFMI- $K_{t,min}$	19	S690-LA-HFMI- $K_{t,min}$
4	S355-TA-HFMI	12	S355-LA-HFMI- $K_{t,max}$	20	S690-LA-HFMI- $K_{t,max}$
5	S690-LA-AW	13	S355-TA-AW- $K_{t,min}$	21	S690-TA-AW- $K_{t,min}$
6	S690-LA-HFMI	14	S355-TA-AW- $K_{t,max}$	22	S690-TA-AW- $K_{t,max}$
7	S690-TA-AW	15	S355-TA-HFMI- $K_{t,min}$	23	S690-TA-HFMI- $K_{t,min}$
8	S690-TA-HFMI	16	S355-TA-HFMI- $K_{t,max}$	24	S690-TA-HFMI- $K_{t,max}$

7.3 Slučaj A - Simulacije cikličkih ispitivanja promatranih detalja

7.3.1 Bazne varijable – opterećenje umorom

Opterećenje umorom se usvaja kao nominalna razlika naprezanja konstantnih amplituda. Kako bi se proračunali rezultati za različite razine razlika naprezanja, varijabla razlike naprezanja $\Delta\sigma$ se zadaje jednolikom (pravokutnom) raspodjelom, gdje se za proračun životnoga vijeka razlike naprezanja kao ulazni parametar za TSM model odabiru nasumično između zadane minimalne ($\Delta\sigma_{min}$) i maksimalne vrijednosti ($\Delta\sigma_{max}$), kako je prikazano tablicom 7.2. Ispitivanja na hidrauličkoj preši su provedena pri konstantnom omjeru naprezanja od $R = 0,1$, što se za stohastički model usvaja kao deterministička vrijednost.

Tablica 7.2. Bazna varijabla opterećenja umorom, $\Delta\sigma$

Varijabla	Raspodjela	$\Delta\sigma_{min}$	$\Delta\sigma_{max}$
$\Delta\sigma$ [MPa]	Uniformna raspodjela (pravokutna)	75	400

7.3.2 Bazne varijable – Modeliranje perioda nastanka pukotine (N_i)

Kako je ranije opisano, nastanak pukotine se proračunava NS pristupom. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala su eksperimentalno određene vlačnim ispitivanjem prikazanim u Poglavlju 4.5. Bazne varijable mehaničkih karakteristika s pripadajućim statističkim parametrima su prikazane tablicom 7.3.

Tablica 7.3. *Bazne varijable mehaničkih karakteristika osnovnog materijala*

Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
$f_{y,S355}$ [MPa]	lognormalna [154]	450,25	5,403	0,012
$f_{u,S355}$ [MPa]	lognormalna [154]	575,50	3,901	0,007
$f_{y,S690}$ [MPa]	Lognormalna [154]	824,67	17,56	0,021
$f_{u,S690}$ [MPa]	lognormalna [154]	867,33	13,07	0,015
E [MPa]	deterministička	210 000	-	-

Ciklički materijalni parametri za NS pristup, prikazani u tablici 6.1, određeni su prilikom kalibracije determinističkoga modela te su usvojeni kao determinističke vrijednosti (tablica 7.4 i 7.5).

Tablica 7.4. *Bazne varijable cikličkih parametara detalja izrađenih od čelika S355J2+N*

Varijabla	S355-LA-AW	S355-LA-HFMI	S355-TA-AW	S355-TA-HFMI
K'	894,27	1233,099	894,27	1233,099
n'	0,15	0,15	0,15	0,15
σ_f' [MPa]	909,25	1168,50	909,25	1168,50
ε_f'	0,5757	0,4698	0,5757	0,4698
b	-0,0900	-0,0750	-0,1110	-0,1200
c	-0,9000	-0,6500	-1,0200	-0,8000

Tablica 7.5. *Bazne varijable cikličkih parametara detalja izrađenih od čelika S690QL*

Varijabla	S690-LA-AW	S690-LA-HFMI	S690-TA-AW	S690-TA-HFMI
K'	1122,009	1805,1215	1122,0900	1805,1215
n'	0,15	0,15	0,15	0,15
σ_f' [MPa]	1083,50	1606,25	1083,50	1606,25
ε_f'	0,5033	0,3168	0,5033	0,3168
b	-0,0900	-0,0900	-0,1400	-0,1180
c	-0,7700	-0,9000	-1,0000	-0,9500

Tvrdoća je izmjerena prijenosnim tvrdomjerom na rubu zavora AW i HFMI obrađenih detalja. Rezultati su prikazani u poglavlju u Poglavlju 4. Usvojene bazne varijable tvrdoće za AW stanje

i HFMI obrađeno stanje slijede normalnu raspodjelu sa statističkim parametrima prikazanim tablicom 7.6.

Tablica 7.6. *Bazne varijable Brinell-ove tvrdoće (HB)*

Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
HB (S355-AW)	normalna	161	18,27	0,113
HB (S355-HFMI)	normalna	222	34,56	0,156
HB (S690-AW)	normalna	202	22,65	0,112
HB (S690-HFMI)	normalna	325	61,83	0,190

Zaostala naprezanja su izmjerena na rubu zavara metodom Rendgenske difrakcije, kako je prikazano u Poglavlju 4. Zaostala naprezanja su izmjerena u AW i HFMI obrađenom stanju. Slučajna varijabla zaostalih naprezanja se prema [154] modelira lognormalnom raspodjelom sa statističkim parametrima prikazanim u tablici 7.7.

Tablica 7.7. *Bazne varijable zaostalih naprezanja*

Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
$\sigma_{res, S355, LA-AW}$ [MPa]	lognormalna	103,3	20,66	0,2
$\sigma_{res, S355, LA-HFMI}$ [MPa]	lognormalna	-37,7	7,54	0,2
$\sigma_{res, S355, TA-AW}$ [MPa]	lognormalna	26,0	5,2	0,2
$\sigma_{res, S355, TA-HFMI}$ [MPa]	lognormalna	-144,0	28,8	0,2
$\sigma_{res, S690, LA-AW}$ [MPa]	lognormalna	121,4	24,28	0,2
$\sigma_{res, S690, LA-HFMI}$ [MPa]	lognormalna	-238,3	47,66	0,2
$\sigma_{res, S690, TA-AW}$ [MPa]	lognormalna	-70,8	14,16	0,2
$\sigma_{res, S690, TA-HFMI}$ [MPa]	lognormalna	-166,8	33,36	0,2

Faktor koncentracije naprezanja je u Poglavlju 5. proračunat metodom konačnih elemenata, a prema [154] se za stohastički model modelira normalnom funkcijom raspodjele sa statističkim parametrima prema tablici 7.8.

Tablica 7.8. *Bazne varijable faktora koncentracije naprezanja K_t*

Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
$K_{t, LA, AW}$	normalna	3,33	0,666	0,2
$K_{t, LA, HFMI}$	normalna	2,64	0,528	0,2
$K_{t, TA, AW}$	normalna	2,25	0,45	0,2
$K_{t, TA, HFMI}$	normalna	1,94	0,388	0,2

7.3.3 Bazne varijable – Modeliranje perioda širenja pukotine (N_p)

Kako je ranije spomenuto, period širenja pukotine, N_p započinje tzv. nastankom tehničke pukotine dubine a_i , a završava u trenutku dosezanja kritične vrijednosti, a_c , kada nastupa otkazivanje detalja. Veličina početne pukotine dubine a_i se modelira lognormalnom raspodjelom, dok je veličina kritične vrijednosti pukotine a_c usvojena kao deterministička vrijednost, budući da varijacija veličine konačne pukotine nema značajan utjecaj na životni vijek kod umora. Izmjerena debljina ploče, t i širina ploče, B koje služe za proračun faktora povećanja $M(k)$ se također usvajaju kao determinističke veličine. Navedene geometrijske veličine su prikazane tablicom 7.9.

Tablica 7.9. Bazne varijable geometrije

Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
a_i [m]	lognormalna	0,0005	0,00033	0,66
a_c [m]	deterministička	0,005	-	-
t [m]	deterministička	0,0084	-	-
B [m]	deterministička	0,05	-	-
Y	deterministička	1,15	-	-

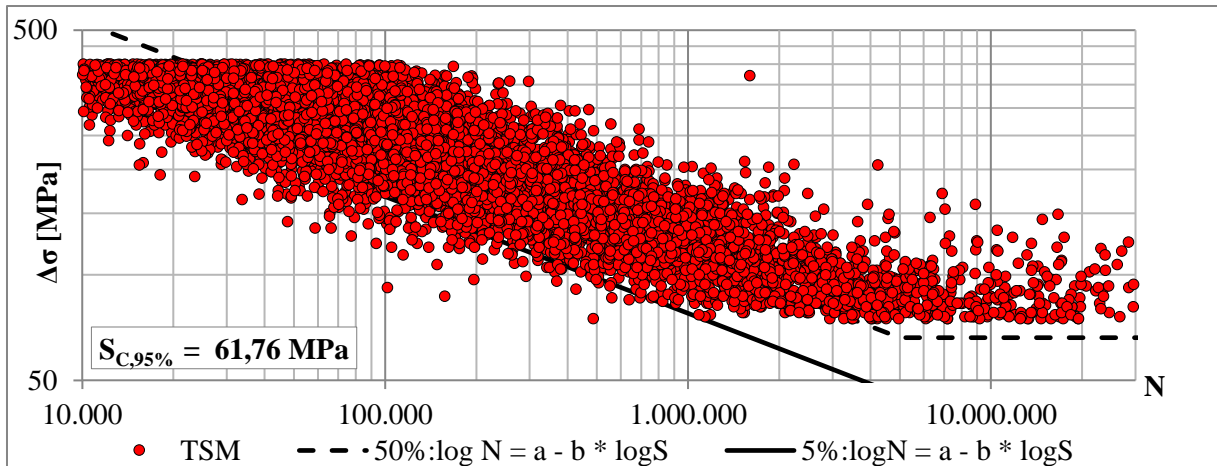
Faktor povećanja $M_k(a)$ se proračunava prema izrazima u poglavlju 6.2.2. Bazne varijable materijalnih parametara su dane u tablici 7.10. Prema kao [154], materijalni parametar C se opisuje lognormalnom raspodjelom, a bazna varijabla parametra m se usvaja kao deterministička.

Tablica 7.10. Bazne varijable materijalnih parametara za proračun širenja pukotine

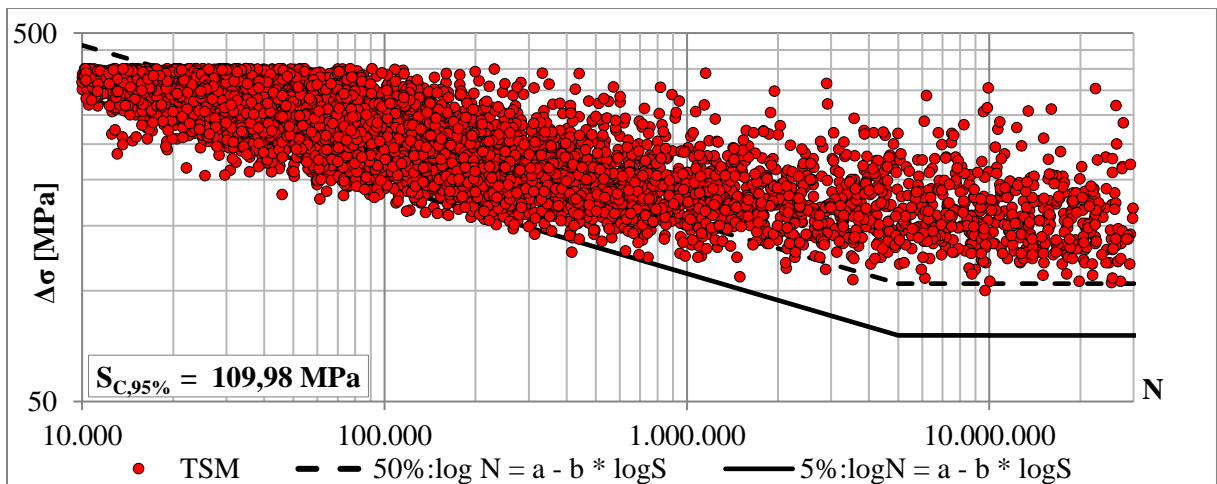
Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
C_{S355}	lognormalna	$5 \cdot 10^{-12}$	$2,90 \cdot 10^{-12}$	0,58
C_{S690}	lognormalna	$6 \cdot 10^{-12}$	$3,48 \cdot 10^{-12}$	0,58
m	deterministička	3	-	-

7.3.4 Rezultati proračuna stohastičkoga modela (Slučaj A)

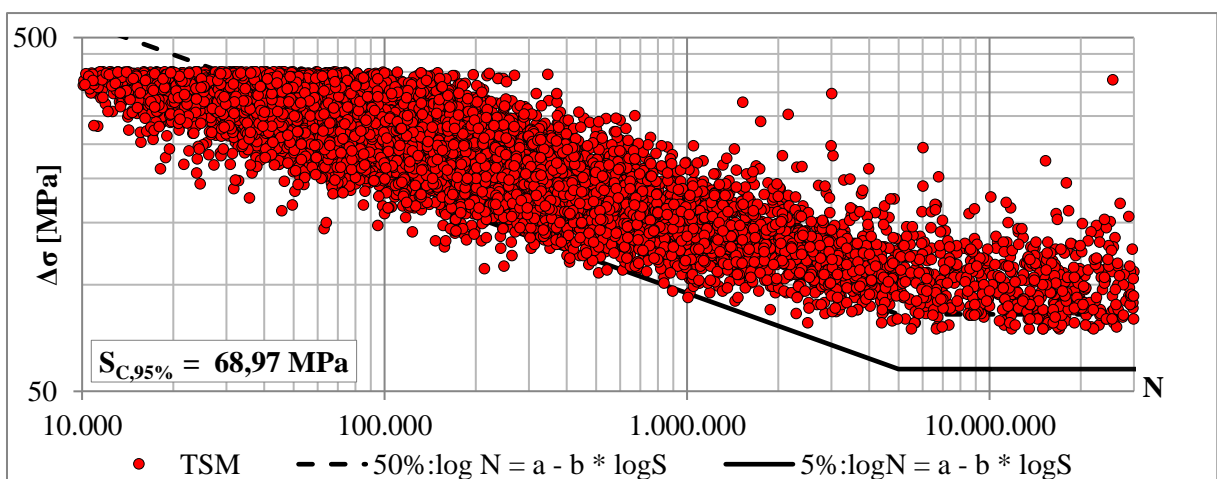
Simulacije cikličkih ispitivanja se odnose promatrane AW i HFMI obrađene zavarene LA i TA detalje izrađene od čelika S355J2+N te S690QL. Pri tome se slučajne varijable odnose na materijal, geometriju i ostale parametre svojstvene ispitanim uzorcima na hidrauličkoj preši opisanim u dijelu 7.2. Na ovaj način se deterministički TSM model proširuje na stohastičku razinu. Rezultati provedene Monte Carlo simulacije za AW i HFMI zavarene LA i TA detalje kvalitete materijala S355J2+N i S690QL prikazane su na slikama 7.1 - 7.8.



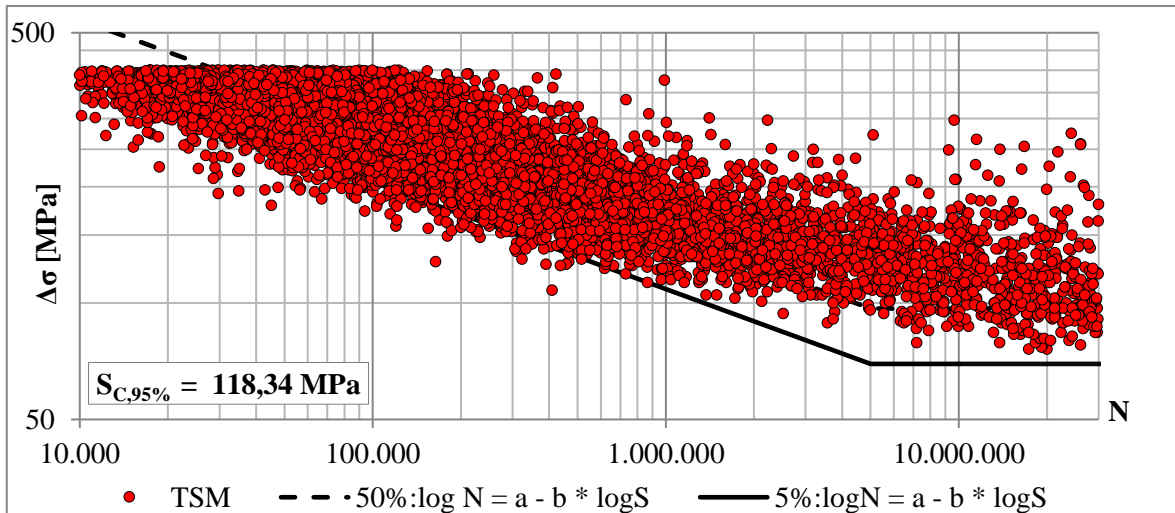
Slika 7.1. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-LA-AW



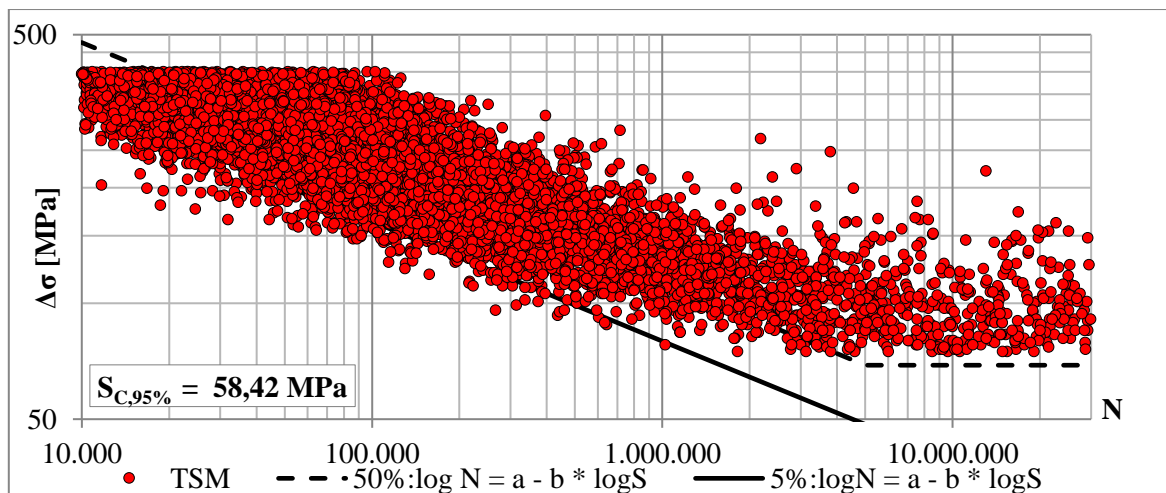
Slika 7.2. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-LA-HFMI



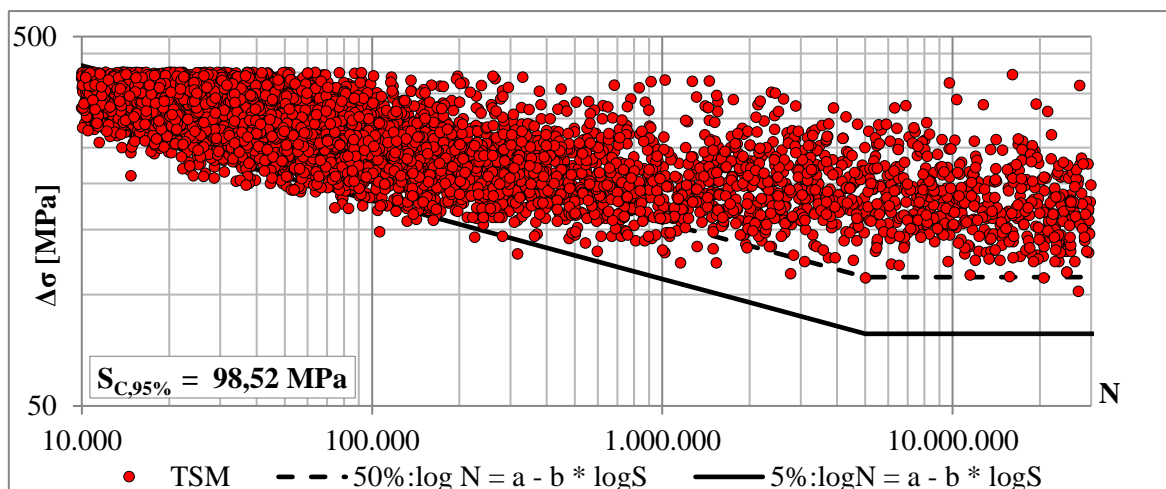
Slika 7.3. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-TA-AW



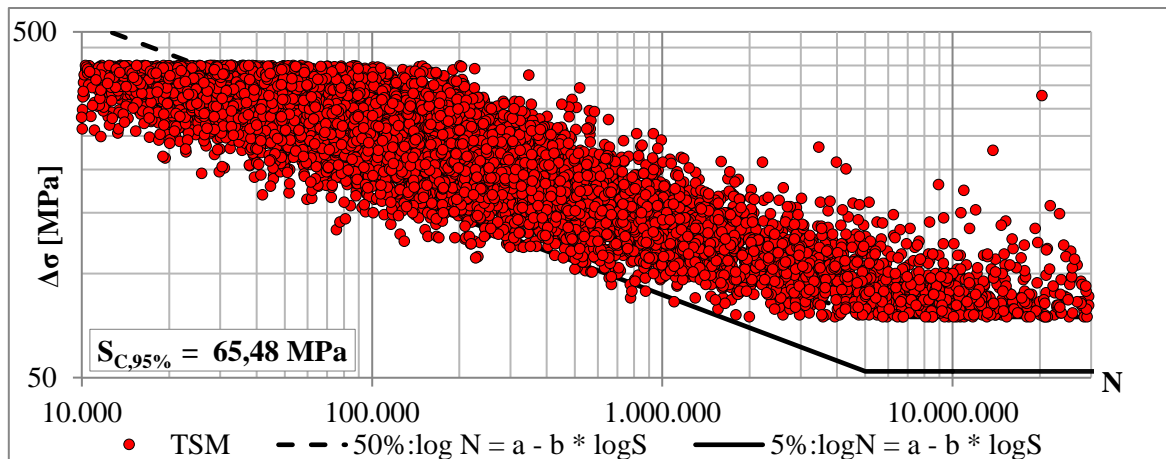
Slika 7.4. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-TA-HFMI



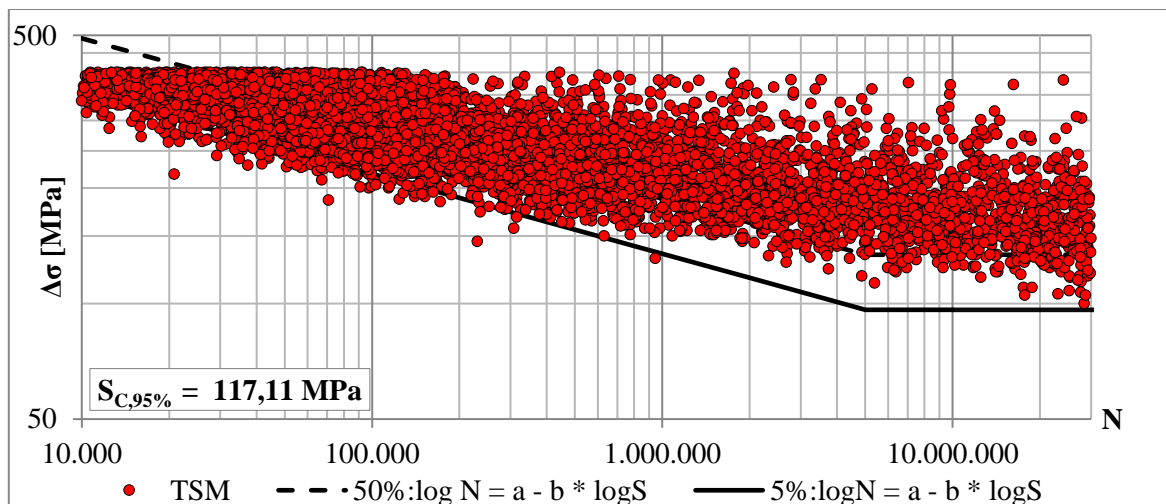
Slika 7.5. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj LA-S690-AW



Slika 7.6. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj LA-690-HFMI



Slika 7.7. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj TA-S690-AW



Slika 7.8. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj TA-690-HFMI

Rezultati stohastičkoga TSM modela su statistički obrađeni te su proračunate karakteristične otpornosti na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa, $S_{C,95\%}$. Tablica 7.11 prikazuje statistički određene otpornosti na umor dobivene determinističkim i stohastičkim TSM modelom.

Tablica 7.11. Rezultati dobiveni determinističkim i stohastičkim TSM modelom (Slučaj 1)

Br. Simulacije	Detalj	Deterministički model, $S_{C,95\%}$ [MPa]	Stohastički model, $S_{C,95\%}$ [MPa]
1	S355-LA-AW	70,52	61,76
2	S355-LA-HFMI	112,06	109,98
3	S355-TA-AW	72,80	68,97
4	S355-TA-HFMI	121,16	118,34
5	S690-LA-AW	69,98	58,42
6	S690-LA-HFMI	117,15	98,52
7	S690-TA-AW	72,40	65,48
8	S690-TA-HFMI	138,03	117,11

Iz rezultata TSM modela je vidljivo značajno povećanje u otpornosti HFMI obrađenih detalja u odnosu na AW detalje. Pri tome se uočava kako se uzimanjem u obzir svih navedenih neizvjesnosti na strani otpornosti detalja dobivaju manje otpornosti u odnosu na rezultate determinističkog modela, odnosno, stohastički model je konzervativniji. Uzimajući u obzir neizvjesnosti na strani otpornosti, stohastički model daje rezultate veće pouzdanosti. Tablica 7.12 prikazuje stupnjeve povećanja životnoga vijeka HFMI obrađenih detalja u odnosu na AW detalje.

Tablica 7.12. *Stupnjevi povećanja otpornosti na umor dobiveni stohastičkim TSM modelom*

R.br.	Detalj	$S_{C,95\%}$ (AW) [MPa]	$S_{C,95\%}$ (HFMI) [MPa]	$S_{C,95\%}$ (HFMI) / $S_{C,95\%}$ (AW)
1.	S355-LA	61,76	109,98	1,78
2.	S355-TA	68,97	118,34	1,71
3.	S690-LA	58,42	98,52	1,68
4.	S690-TA	65,48	117,11	1,79

U slučaju detalja izrađenih od čelika S355J2+N, koeficijent povećanja otpornosti za LA-HFMI detalje u odnosu na LA-AW detalje iznosi 1,78. Koeficijent povećanja otpornosti za TA-HFMI u odnosu na TA-AW iznosi 1,71. Kod detalja izrađenih od čelika S690QL, koeficijenti povećanja otpornosti su nešto veći. U slučaju detalja izrađenih od čelika S690QL, koeficijent povećanja otpornosti za LA-HFMI detalje u odnosu na LA-AW detalje iznosi 1,68, dok za TA-HFMI detalj u odnosu na TA-AW detalj iznosi 1,79 (kod determinističkoga modela iznosi 1,91).

U slučaju detalja izrađenih od čelika S355J2+N, stupanj povećanja otpornosti je nešto viši kod stohastičkog modela (1,71 za LA detalj i 1,78 za TA detalj) u odnosu na deterministički model (1,59 za LA detalj i 1,66 za TA detalj). U slučaju čelika više čvrstoće, stupanj povećanja karakterističnih otpornosti dobivenih determinističkim i stohastičkim TSM modelom je približno jednak kod LA detalja (1,67 za čelik S355J2+N te 1,68 za čelik S690QL), dok je u slučaju TA detalja stupanj povećanja niži kod S690QL detalja i iznosi 1,79 (kod čelika S355 J2+N u ovom slučaju iznosi 1,91).

Iako je i ispitivanjima i determinističkim modelom pokazano da je životni vijek HFMI obrađenih detalja izloženih umoru veći kod detalja izrađenih od čelika više čvrstoće (S690QL), stohastički model u ovom slučaju ne pokazuje takvo povećanje. Jedan od razloga za ovakav rezultat je manji broj uključenih rezultata ispitivanja detalja izrađenih od čelika S690QL u

odnosu na detalje izrađene od čelika S355J2+N. Drugi razlog je i veličina razlike naprezanja koja je kod cikličkih ispitivanja detalja izrađenih od S690QL bila jako visoka i nije se pokrilo područje većih ciklusa, odnosno, manjih razlika naprezanja. Zbog navedenih razloga, u nastavku je prikazana kalibracija determinističkoga i stohastičkoga modela za detalje izrađene od čelika S690QL gdje su rezultati cikličkih ispitivanja iz ovog istraživanja nadopunjeni rezultatima cikličkih ispitivanja sličnih detalja iz literature.

7.3.5 Kalibracija TSM modela - S690QL detalji s dodatnim ispitivanjima iz literature

U nastavku je prikazan dodatni slučaj kalibracije determinističkoga i stohastičkoga TSM modela za detalje S690-LA-HFMI i S690-TA-HFMI, gdje su rezultati cikličkih ispitivanja nadopunjeni rezultatima cikličkih ispitivanja iz literature. Usvojeni geometrijski i materijalni ciklički parametri za proračun nastanka pukotine, prikazani su u tablici 7.13. Ostali parametri za proračun životnoga vijeka su identični ranije usvojenim parametrima za detalje S690-LA-HFMI i S690-TA-HFMI.

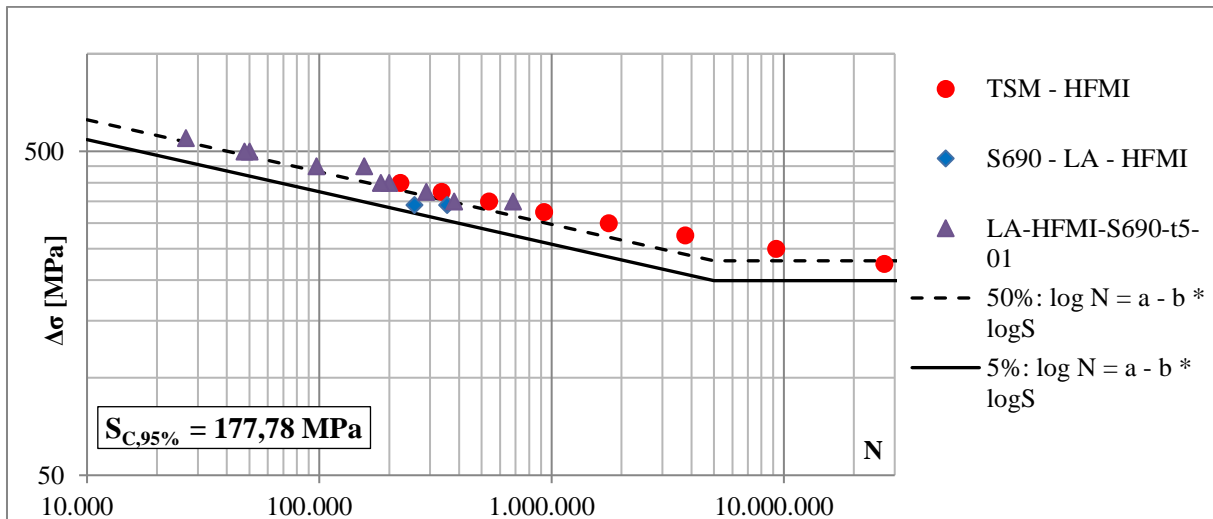
Tablica 7.13. *Ciklički parametri za kalibraciju TSM modela (S690 detalji s dodatnim cikličkim ispitivanjima iz literature)*

Varijabla	S690-LA-HFMI	S690-TA-HFMI
K'	1805,1215	1805,1215
n'	0,1500	0,15
σ_f' [MPa]	1606,25	1606,25
ε_f'	0,3168	0,3168
b	-0,0970	-0,0950
c	-0,4900	-0,6200

Rezultati proračuna životnih vjekova determinističkim TSM modelom su prikazani u tablicama 7.14 i 7.15 te na slikama 7.9 i 7.10.

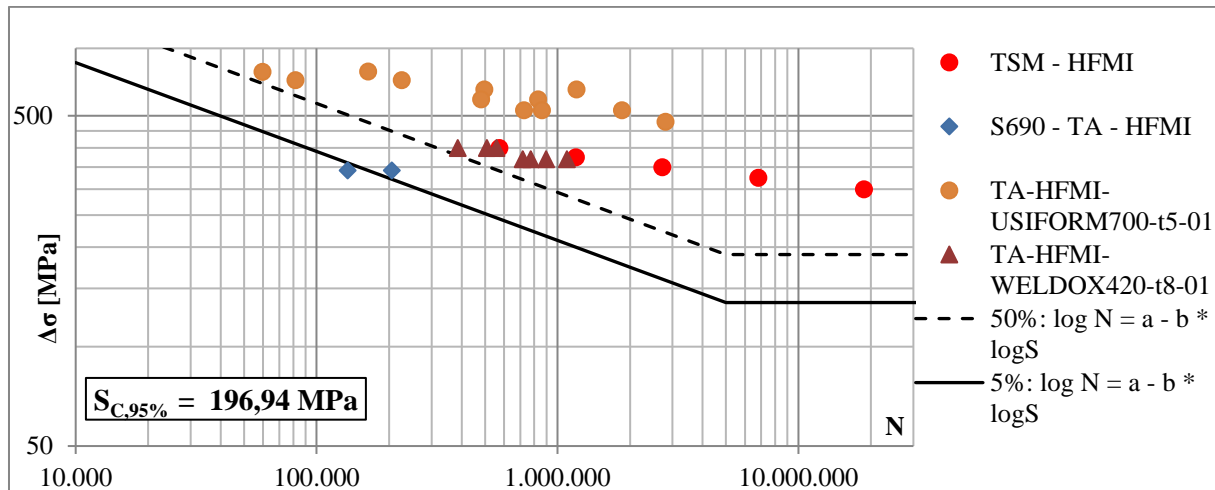
Tablica 7.14. Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S690QL) – TSM model

$\Delta\sigma$	Period nastanka pukotine, $N_{i, HFMI}$	Period širenja pukotine, N_P
75	4980118801749	1542168
100	253227403339	650604
125	20235667879	333116
150	2510879951	192763
175	431088714	121398
200	96280869	81324
225	26965091	57117
250	9202464	41637
275	3721815	31283
300	1734944	24096
325	908001	18955
350	521718	15182
375	323106	12346
400	212577	10165

**Slika 7.9.** Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-LA-HFMI

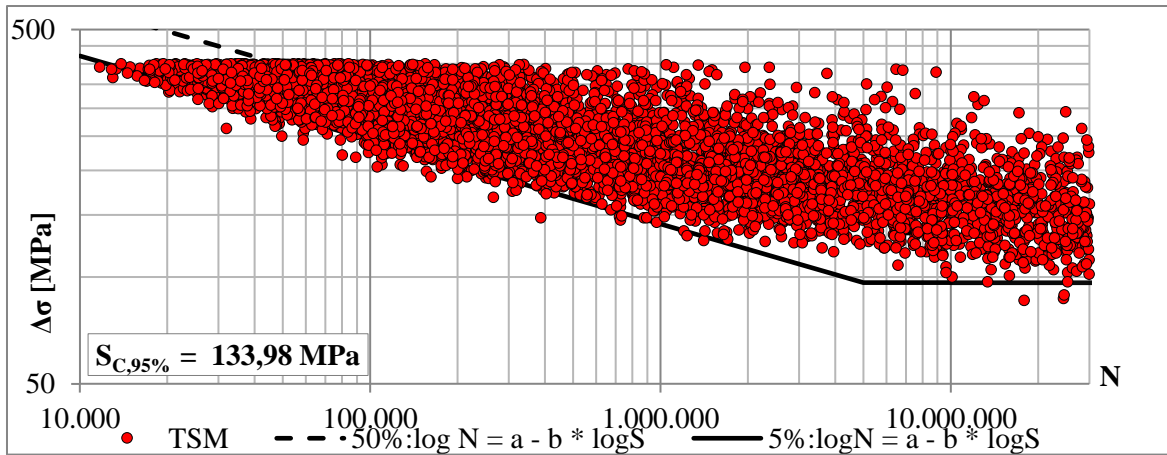
Tablica 7.15. Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S690QL) – TSM model

$\Delta\sigma$	Period nastanka pukotine, $N_{i, HFMI}$	Period širenja pukotine, N_P
75	216868089942784	2803860
100	9263663482346	1182884
125	731307114739	605646
150	88442735028	350476
175	14348853462	220714
200	2885429437	147865
225	684166464	103850
250	185091787	75698
275	55914101	56873
300	18613439	43810
325	6778356	34465
350	2694185	27599
375	1168961	22434
400	553835	18480

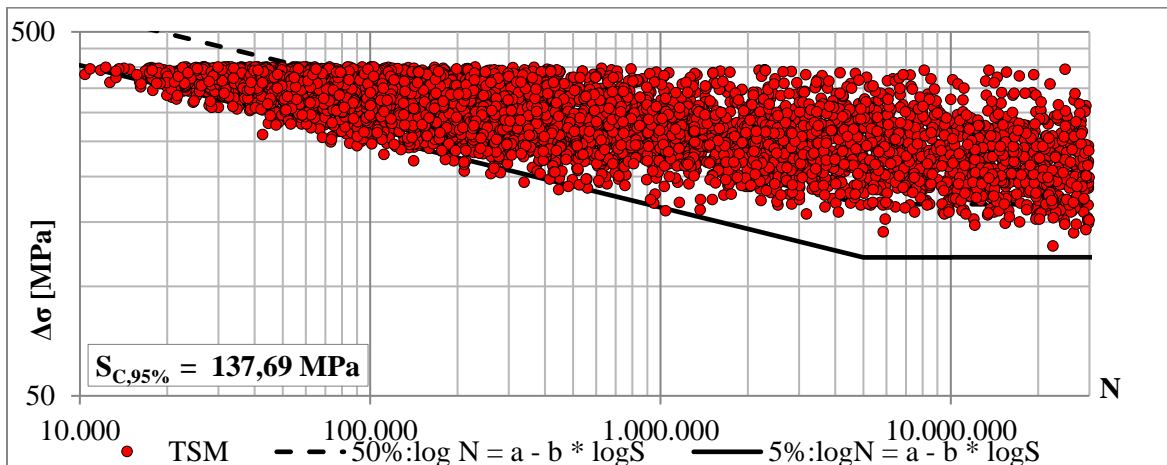
**Slika 7.10.** Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja S690-TA-HFMI

Nakon proračuna životnog vijeka promatranih detalja determinističkim TSM modelom, statističkom analizom je proračunata karakteristična otpornost na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa. Za detalj S690-LA-HFMI iznosi $S_{C,95\%} = 177,78$ MPa, a za S690-TA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 196,94$ MPa.

Nadalje, proveden je proračun životnih vjekova stohastičkim modelom gdje se u obzir uzimaju sve ranije navedene nepouzdanosti na strani otpornosti, čije su veličine identične ranije usvojenima za detalje S690-LA-HFMI i S690-TA-HFMI. Ciklički materijalni parametri se za proračun usvajaju kao determinističke vrijednosti, prema tablici 7.13. Rezultati proračuna su prikazani slikama 7.11 i 7.12.



Slika 7.11. Rezultati proračuna stohastičkoga TSM modela za detalj S690-LA-HFMI (nadopuna s rezultatima iz literature)



Slika 7.12. Rezultati proračuna stohastičkoga TSM modela za detalj S690-TA-HFMI (nadopuna s rezultatima iz literature)

Nakon provedenog proračuna životnog vijeka promatranih detalja stohastičkim TSM modelom, statističkom analizom je proračunata karakteristična otpornost na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa. Za detalj S690-LA-HFMI karakteristična otpornost iznosi $S_{C,95\%} = 133,98$ MPa, a za S690-TA-HFMI detalj je $S_{C,95\%} = 137,69$ MPa. Proračunate otpornosti detalja determinističkim i stohastičkim TSM modelima koji su kalibrirani na vlastitim ispitivanjima dopunjenima s ispitivanjima iz literature za detalje S690-LA-HFMI i S690-TA-HFMI pokazuju značajno veće vrijednosti u odnosu na karakteristične otpornosti istih tipova detalja (LA i TA) izrađenih od čelika S355J2+N.

Vidi se da su u ovom slučaju karakteristične otpornosti znatno veće za detalje izrađene od čelika S690QL u odnosu na rezultate dobivene kod detalja S355J2+N, prikazanih tablicom 7.12. Također, rezultati pokazuju da TA detalji imaju veću otpornost na umor u odnosu na LA detalje.

7.4 Slučaj B – Simulacije za širi raspon geometrije

7.4.1 Uvod

Budući da TA i LA detalji mogu imati različite debljine ploča ili duljine ukrućenja (u slučaju LA detalja), faktori koncentracije naprezanja, K_t , mogu obzirom na to biti različiti za isti tip detalja. Iz toga razloga je provedena i parametarska analiza kako bi se istražio raspon karakterističnih otpornosti na umor za pojedini detalj te utjecaj promjenjivosti te otpornosti u odnosu na promjenu faktora koncentracije naprezanja, odnosno na potencijalno variranje geometrije detalja.

7.4.2 Bazne varijable (Slučaj B)

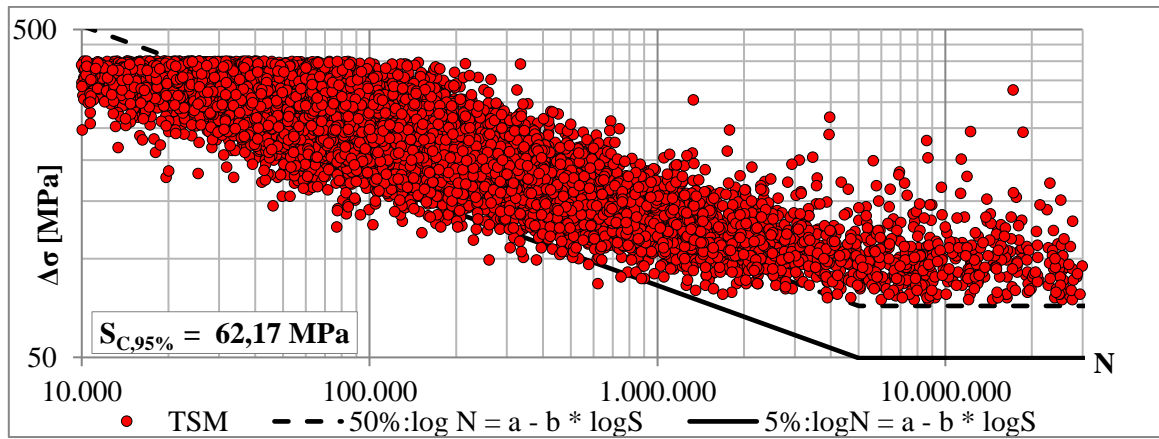
Budući da se ovdje radi samo o varijaciji geometrije u smislu faktora koncentracije naprezanja, K_t , bazne varijable opterećenja, materijalnih parametara i zaostalih naprezanja se zadržavaju kao i u Slučaju A (tablice 7.2 – 7.10). Kako bi se istražio utjecaj promjene geometrije promatranih detalja koja utječe na promjenu faktora koncentracije naprezanja, provedene su simulacije proračuna za različite faktore koncentracije naprezanja. Raspon faktora koncentracije naprezanja za LA-AW i LA- HFMI detalje odabran je prema [188], a raspon za TA-AW i TA-HFMI analogno rasponu faktora za LA detalje, u odnosu na proračunati faktor koncentracije naprezanja iz poglavlja 6. Bazne varijable faktora koncentracije naprezanja prikazane su u tablici 7.16.

Tablica 7.16. Bazne varijable faktora koncentracije naprezanja K_t

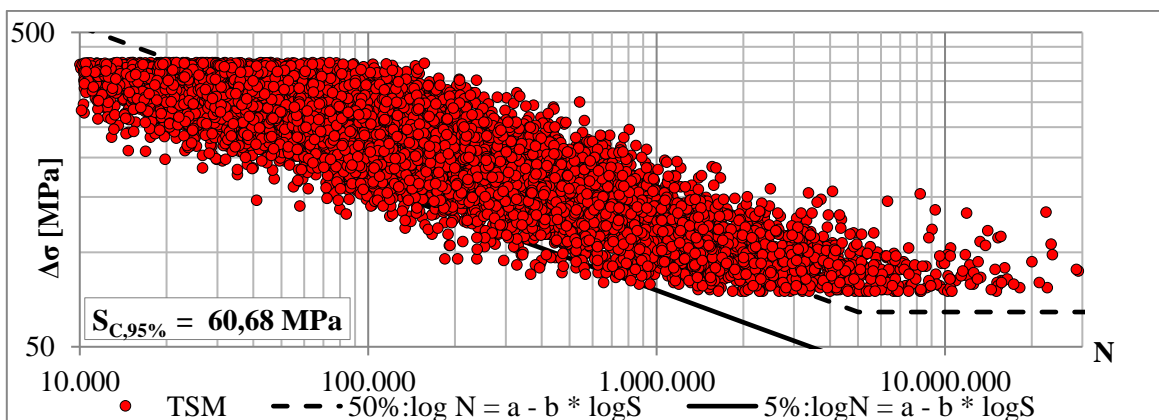
Varijabla	Raspodjela	μ	σ	CoV
$K_{t, LA, AW, min}$	normalna	2,6	0,52	0,2
$K_{t, LA, AW, max}$	normalna	4,0	0,80	0,2
$K_{t, LA, HFMI, min}$	normalna	1,8	0,36	0,2
$K_{t, LA, HFMI, max}$	normalna	2,2	0,44	0,2
$K_{t, TA, AW, min}$	normalna	1,82	0,36	0,2
$K_{t, TA, AW, max}$	normalna	2,60	0,52	0,2
$K_{t, TA, HFMI, min}$	normalna	1,41	0,28	0,2
$K_{t, TA, HFMI, max}$	normalna	2,24	0,45	0,2

7.4.3 Rezultati proračuna (Slučaj B)

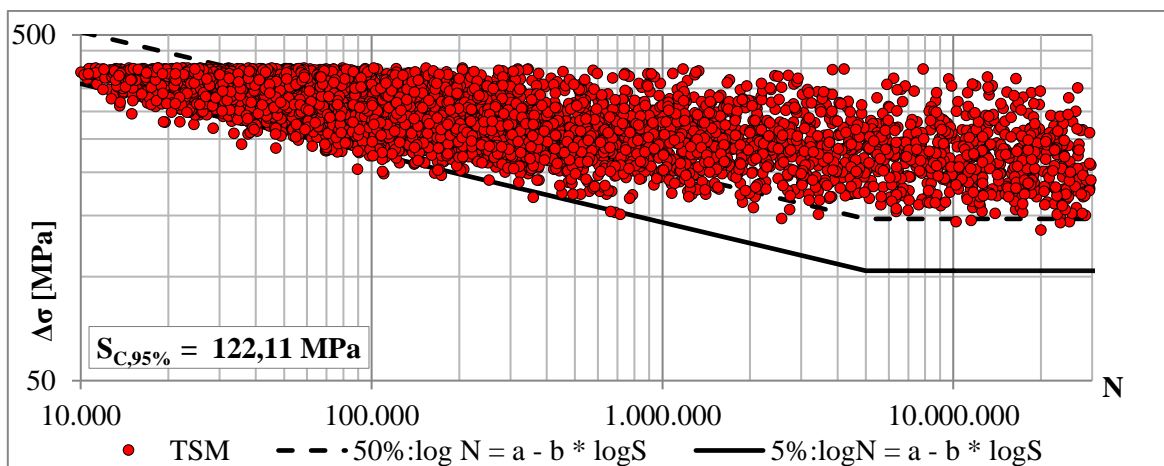
Rezultati provedene Monte Carlo simulacije za AW zavarene LA i TA detalje kvalitete materijala S355J2+N prikazane su na slikama 7.13- 7.28.



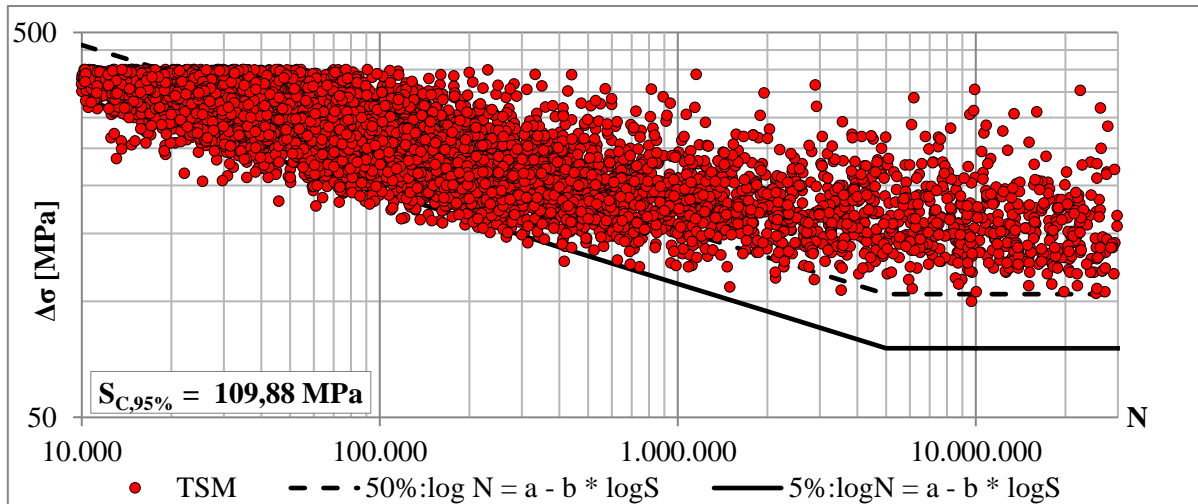
Slika 7.13. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 09_S355-LA-AW – Ktmin



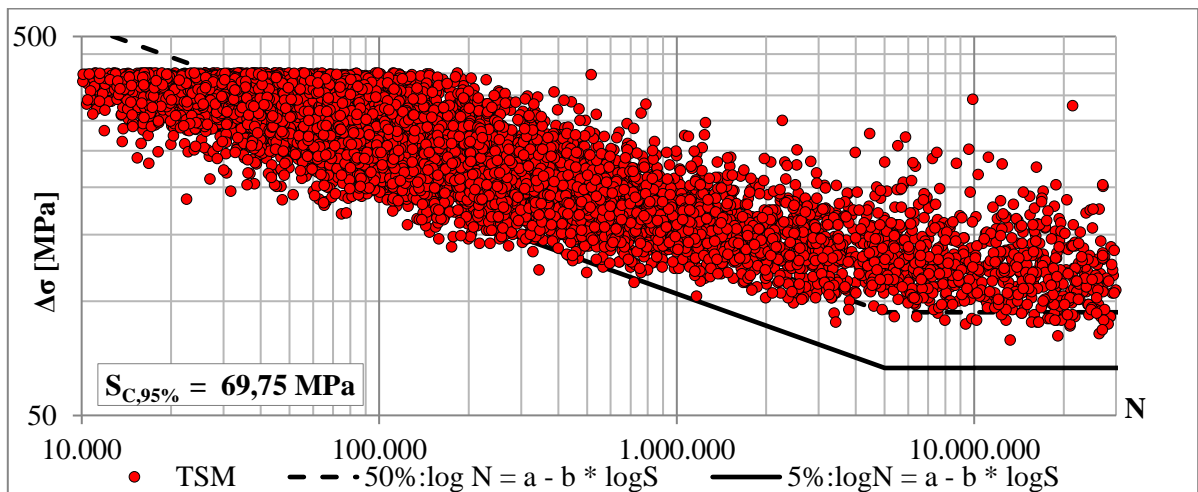
Slika 7.14. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 10_S355-LA-AW – Ktmax



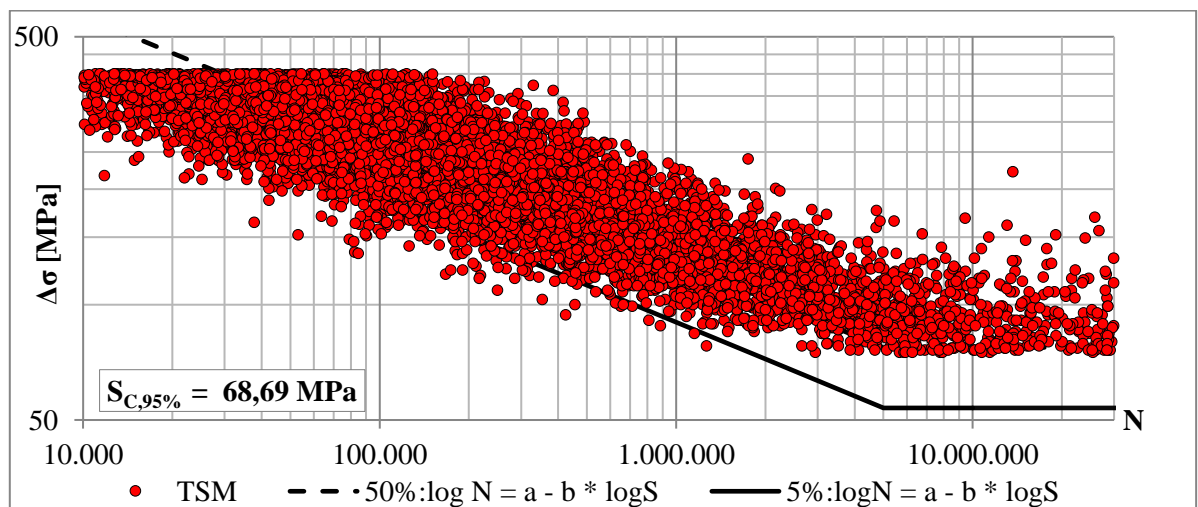
Slika 7.15. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 11_S355-LA-HFMI – Ktmin



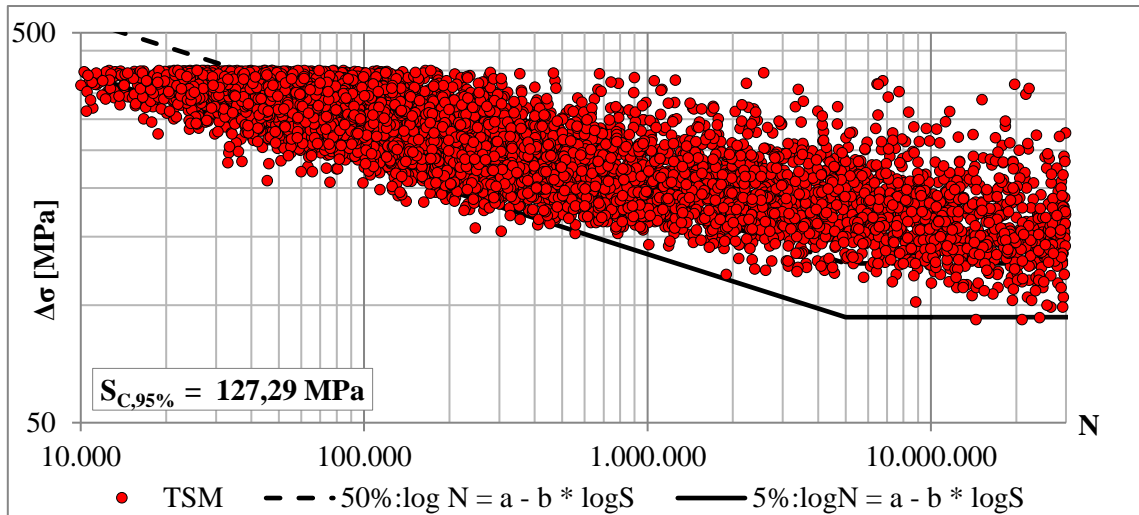
Slika 7.16. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 12_S355-LA-HFMI – Ktmax



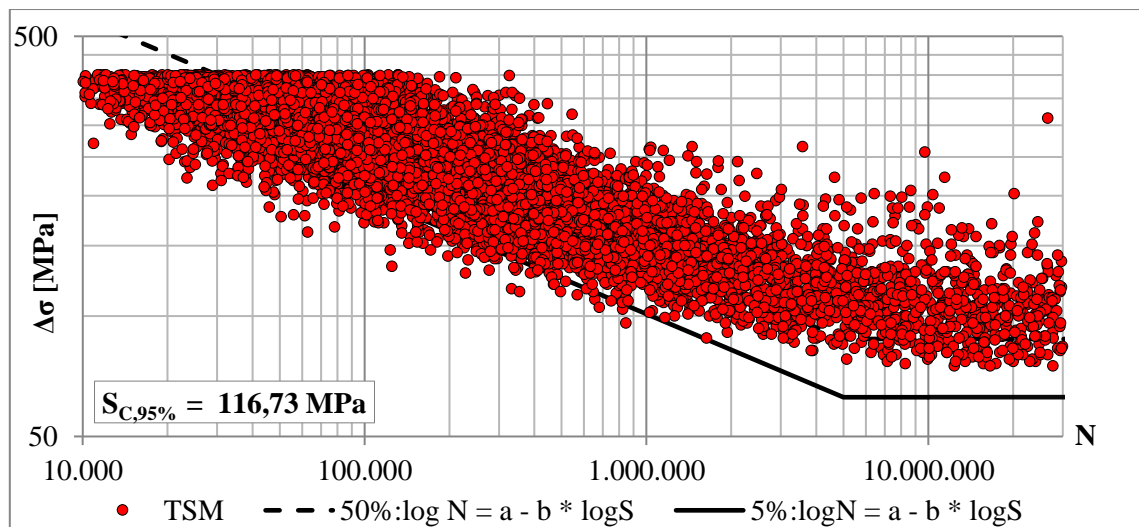
Slika 7.17. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 13_S355-TA-AW – Ktmin



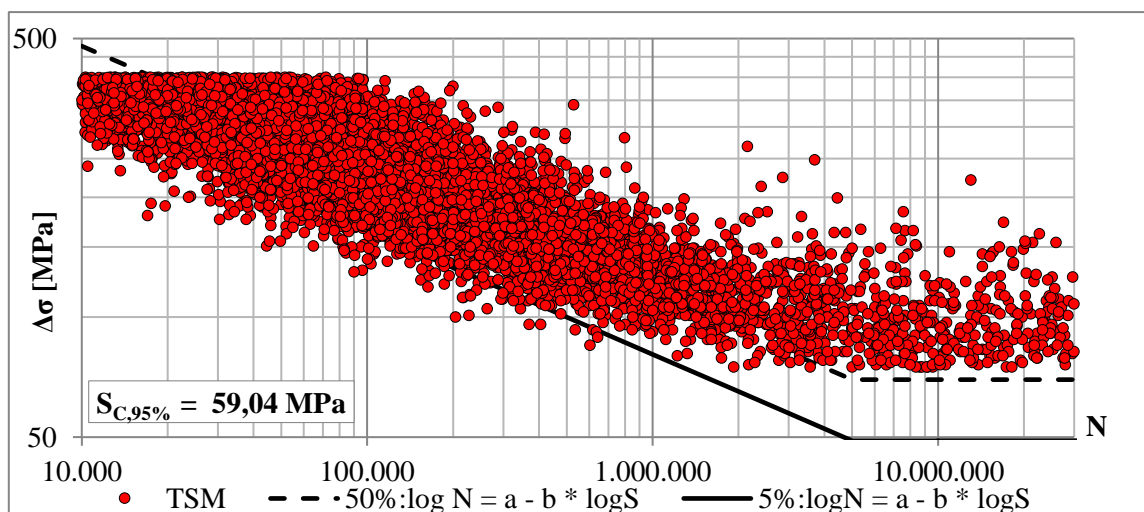
Slika 7.18. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 14_S355-TA-AW – Ktmax



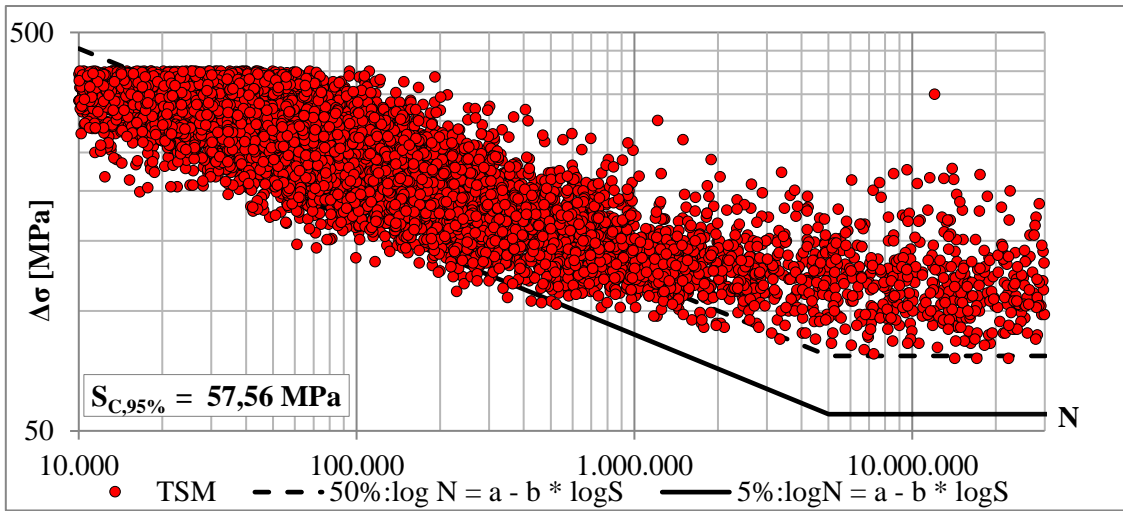
Slika 7.19. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 15_S355-TA-HFMI – Ktmin



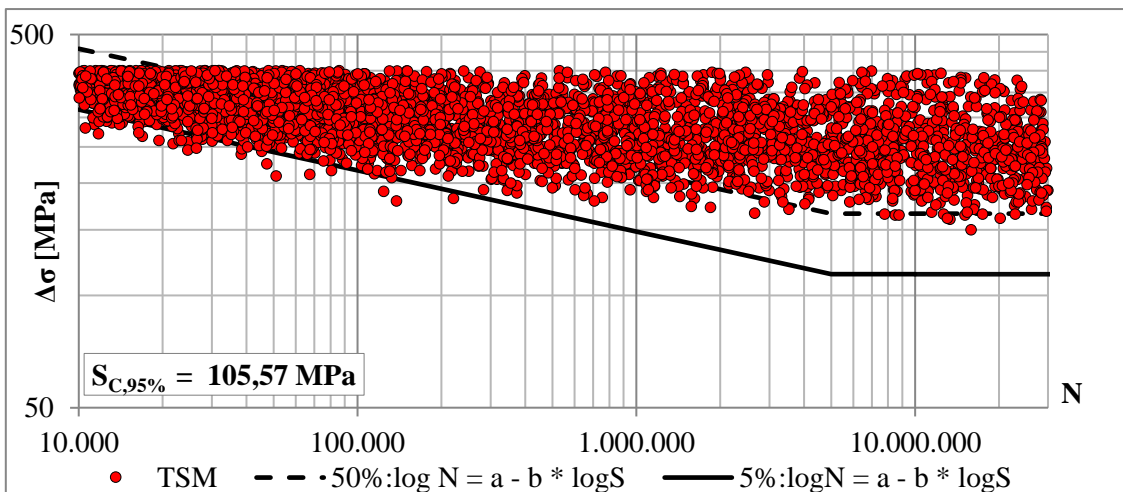
Slika 7.20. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 16_S355-TA-HFMI – Ktmax



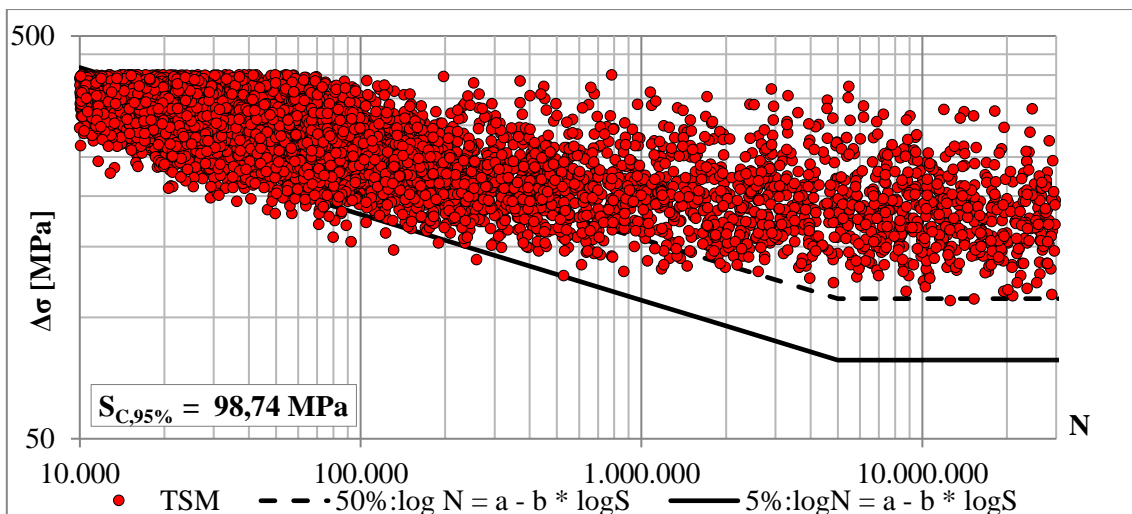
Slika 7.21. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 17_S690-LA-AW – Ktmin



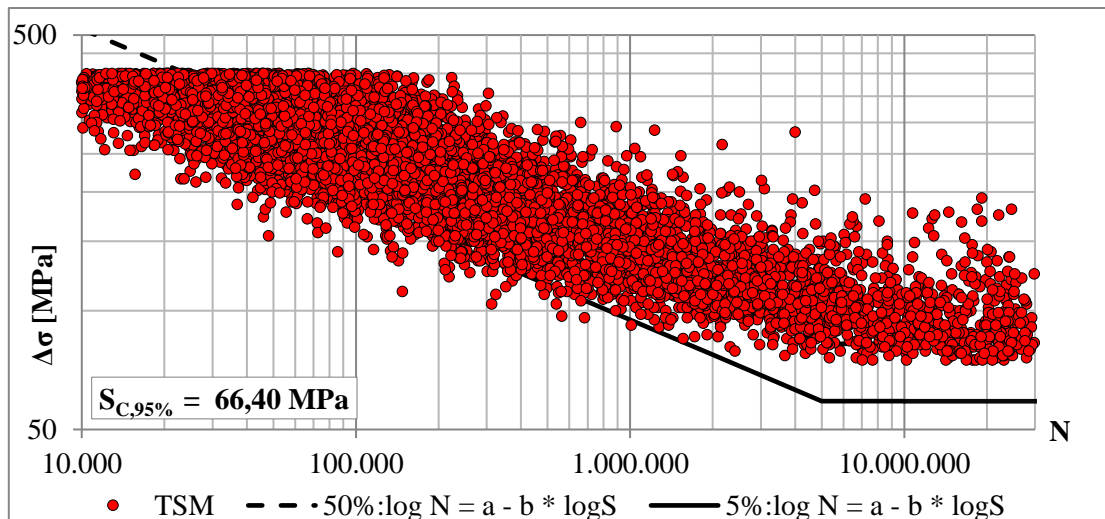
Slika 7.22. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 18_S690-LA-AW – Ktmax



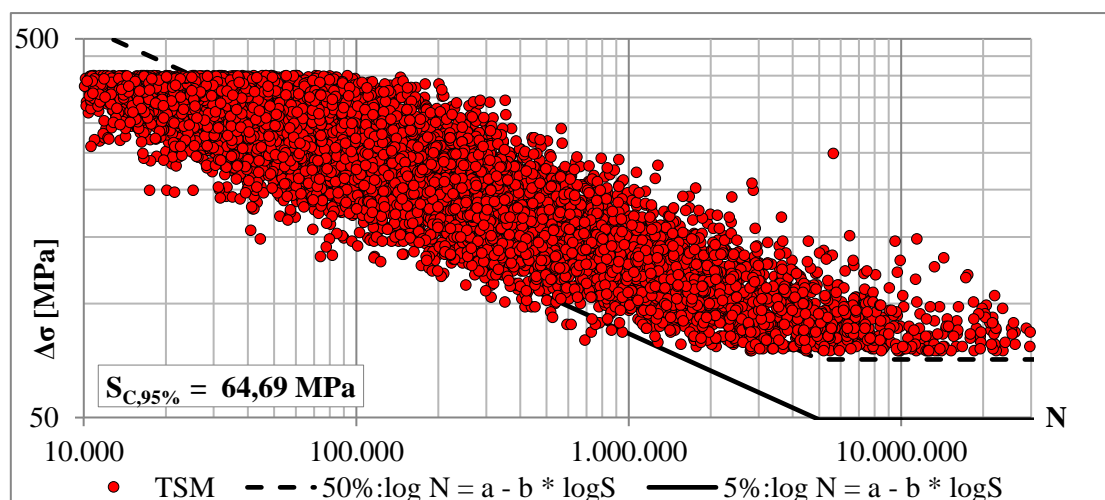
Slika 7.23. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 19_S690-LA-HFMI – Ktmin



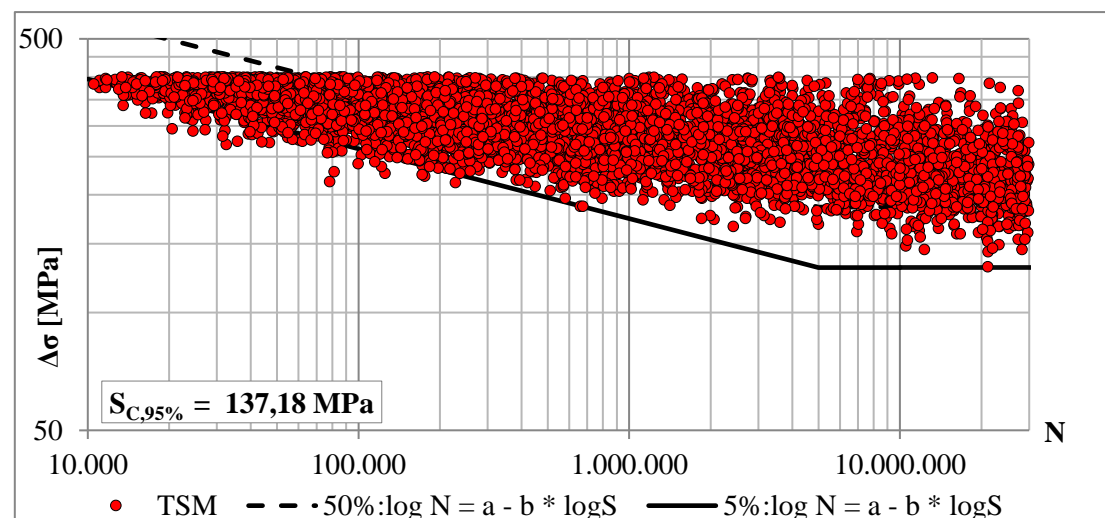
Slika 7.24. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 20_S690-LA-HFMI – Ktmax



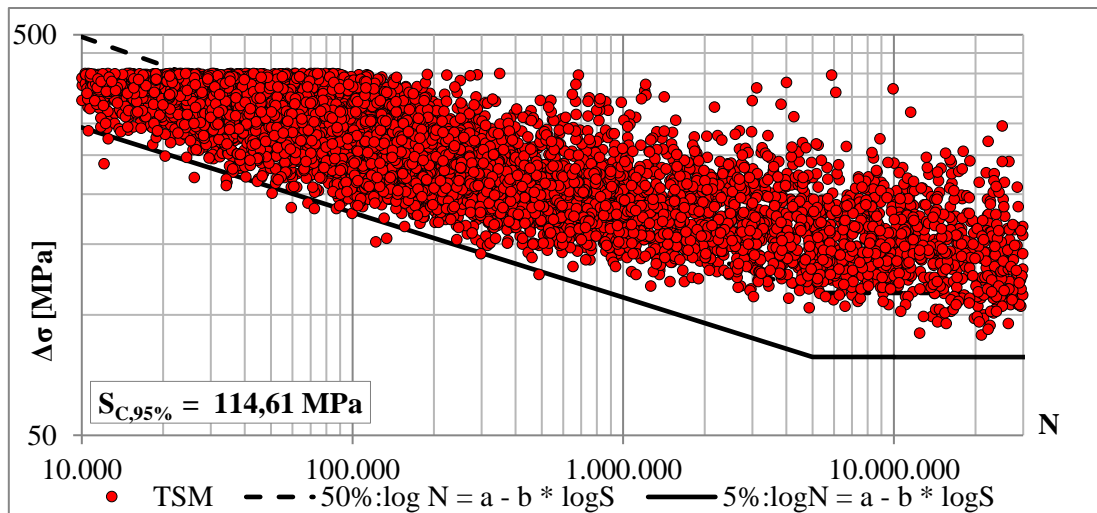
Slika 7.25. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 21_S690-TA-AW – Ktmin



Slika 7.26. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 22_S690-TA-AW – Ktmax



Slika 7.27. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 23_S690-TA-HFMI – Ktmin



Slika 7.28. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 24_S690-TA-HFMI – Ktmax

Tablica 7.17 prikazuje statističkom analizom proračunate karakteristične otpornosti promatranih detalja na umor, $S_{C,95\%}$, u odnosu na različite faktore koncentracije naprezanja, K_t .

Tablica 7.17. Rezultati dobivenih statističkom analizom – Slučaj B

Br. Simulacije	Detalj	Variranje parametra K_t	$S_{C,95\%}$ [MPa]
9	S355-LA-AW - K_{tmin}	$K_{tmin} = 2,69$	62,17
10	S355-LA-AW - K_{tmax}	$K_{tmax} = 3,85$	60,68
11	S355-LA-HFMI - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,92$	122,11
12	S355-LA-HFMI - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,64$	109,88
13	S355-TA-AW - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,82$	69,75
14	S355-TA-AW - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,60$	68,69
15	S355-TA-HFMI - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,41$	127,29
16	S355-TA-HFMI - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,24$	116,73
17	S690-LA-AW - K_{tmin}	$K_{tmin} = 2,69$	59,04
18	S690-LA-AW - K_{tmax}	$K_{tmax} = 3,85$	57,56
19	S690-LA-HFMI - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,92$	105,57
20	S690-LA-HFMI - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,64$	98,74
21	S690-TA-AW - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,82$	66,40
22	S690-TA-AW - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,60$	64,69
23	S690-TA-HFMI - K_{tmin}	$K_{tmin} = 1,41$	137,18
24	S690-TA-HFMI - K_{tmax}	$K_{tmax} = 2,24$	114,61

Maksimalni K_t daje minimalnu karakterističnu otpornost na umor za pojedini detalj i obrnuto. Tablica 7.18 prikazuje raspone minimalnih ($S_{C,95\%,min}$) i maksimalnih ($S_{C,95\%,max}$) karakterističnih otpornosti na umor u odnosu na karakterističnu otpornost na umor dobivenu na temelju proračunatog faktora koncentracije naprezanja ($S_{C,95\%}$).

Tablica 7.18. Rasponi minimalnih i maksimalnih karakterističnih otpornosti na umor

Detalj	$S_{C,95\%}$ [MPa]	$S_{C,95\%, \min}$ [MPa]	$S_{C,95\%, \max}$ [MPa]	$S_{C,95\%, \max} - S_{C,95\%, \min}$ [MPa]
S355-LA-AW	61,76	60,68	62,17	1,49
S355-LA-HFMI	109,98	109,88	122,11	12,23
S355-TA-AW	68,97	68,69	69,75	1,06
S355-TA-HFMI	118,34	116,73	127,29	10,56
S690-LA-AW	58,42	57,56	59,04	1,48
S690-LA-HFMI	98,52	98,74	105,57	6,83
S690-TA-AW	65,48	64,69	66,40	1,71
S690-TA-HFMI	117,11	114,61	137,18	22,57

Iz rezultata i tablice 7.18 vidljivo je da varijacija faktora koncentracije naprezanja za AW detalje nema veliki utjecaj na promjenu karakteristične otpornosti, dok je kod HFMI detalja promjena karakteristične otpornosti ipak značajnija. Razlika u minimalnoj i maksimalnoj karakterističnoj otpornosti za AW detalje iznosi od 1,06 MPa do 1,71 MPa, dok je razlika kod HFMI obrađenih detalja od 6,83 MPa do 22,57 MPa. Prosječna razlika minimalnih i maksimalnih otpornosti za AW detalje iznosi 1,44 MPa, dok za HFMI detalje iznosi 13,05 MPa.

7.5 Zaključak

U ovom se poglavlju TSM model proširuje na stohastičku razinu, gdje se pomoću Monte Carlo simulacije provode simulacije laboratorijskih ispitivanja. Stohastičkim TSM modelom je moguće provesti procjenu životnoga vijeka kod umora AW i HFMI obrađenih čeličnih konstrukcijskih detalja. Razvijeni stohastički model, koji u sebi sadrži neizvjesnosti HFMI parametara poboljšanja, omogućuje pouzdanu procjenu životnog vijeka kod umora AW i HFMI poboljšanih detalja. Uočava se da stohastički TSM model uzimanjem u obzir neizvjesnosti na strani otpornosti daje konzervativnije rezultate u odnosu na deterministički model. Također, uzimajući u obzir neizvjesnosti na strani otpornosti, stohastički model daje rezultate veće pouzdanosti. To se najbolje vidi usporedbom karakterističnih otpornosti na umor dobivenih statističkom analizom rezultata stohastičkoga i determinističkoga TSM modela.

U slučaju detalja izrađenih od čelika S355J2+N, stupanj povećanja otpornosti je nešto viši kod stohastičkog modela (1,71 za LA detalj i 1,78 za TA detalj) u odnosu na deterministički model (1,59 za LA detalj i 1,66 za TA detalj). U slučaju čelika više čvrstoće, stupanj povećanja karakterističnih otpornosti dobivenih determinističkim i stohastičkim TSM modelom je približno jednak kod LA detalja (1,67 za čelik S355J2+N te 1,68 za čelik S690QL), dok je u

slučaju TA detalja stupanj povećanja niži kod S690QL detalja i iznosi 1,79 (kod čelika S355 J2+N u ovom slučaju iznosi 1,91).

Nadalje, kako bi se dobila šira slika za različite geometrije detalja, odnosno, mogući raspon faktora koncentracije naprezanja unutar pojedinog tipa detalja, provedena je parametarska analiza. Rezultati ukazuju na to da kod AW detalja razlika u faktoru koncentracije naprezanja za pojedini detalj nema značajnu ulogu u promjeni otpornosti detalja na umor, što kod HFMI obrađenih detalja nije slučaj. Širi raspon faktora koncentracije naprezanja utječe značajnije na samu otpornost AW detalja (1,06 MPa do 1,71 MPa), dok je moguća razlika u karakterističnoj otpornosti na umor HFMI detalja značajna i iznosi od 10,56 MPa do 22,57 MPa.

Treba napomenuti da su u okviru ovoga istraživanja deterministički i stohastički TSM modeli kalibrirani za LA i TA detalje, međutim, ista se procedura može ponoviti i za bilo koji drugi detalj izložen umoru.

8 ZAKLJUČAK

8.1 Izvorni znanstveni doprinos

Cilj disertacije je bio istražiti parametre HFMI poboljšanja životnog vijeka zavarenih detalja kod umora te razviti, kalibrirati i vrednovati proračunske modele za procjenu životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih zavarenih čeličnih detalja izloženih cikličkim naprezanjima konstantnih amplituda. Uz teorijske i numeričke modele, provedeno je opsežno laboratorijsko mjerenje HFMI parametara poboljšanja te opsežno laboratorijsko cikličko ispitivanje zavarenih detalja, na temelju čega je dobiven i bolji uvid u učinkovitost HFMI metode. Na temelju dostupnih rezultata ispitivanja iz literature i vlastitih laboratorijskih ispitivanja, proveden je razvoj i kalibracija determinističkoga i stohastičkoga modela za procjenu životnoga vijeka zavarenih detalja izloženih umoru. Istraživanje je omogućilo proširivanje dosadašnjih saznanja o problemu umora, HFMI metodi i HFMI parametrima poboljšanja. Istraživanje će, između ostaloga, doprinijeti i implementiranju HFMI metode u svakodnevnu praksu u građevinarstvu i drugim industrijama. Na temelju istraživanja su proizašli sljedeći izvorni znanstveni doprinosi:

1. Izrada numeričkih modela temeljenih na preciznom 3D skeniranju AW i HFMI detalja za definiranje faktora koncentracije naprezanja. Ovi modeli mogu se u budućnosti koristiti i za provođenje različitih parametarskih analiza.
2. Utvrđivanje statističkih parametara baznih varijabli otpornosti na umor za promatrane konstrukcijske detalje.
3. Razvoj i kalibracija naprednog determinističkoga modela za procjenu životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru.
4. Razvoj stohastičkoga modela koji omogućuje proširenje eksperimentalnih saznanja dobivenih na ograničenom broju uzoraka zavarenih čeličnih detalja izloženih umoru.

8.2 Neposredni zaključci

Na temelju ovog istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1. Obrada zavarenih detalja metodom mehaničkoga udara visoke frekvencije jednostavna je i ekonomična metoda povećanja otpornosti zavarenih detalja izloženih umoru, a ponekad može biti i jedino preostalo rješenje kada nije moguće ostvariti dostatnu otpornost konstrukcije na umor klasičnim pravilima projektiranja. Poboljšanje otpornosti se očituje kroz poboljšanje geometrije unutar zavarenog detalja, odnosno, povećanje radijusa ruba zavora (smanjenje koncentracije naprezanja), unos tlačnih zaostalih naprezanja kojima se umanjuju ili uklanjaju nepovoljna vlačna zaostala naprezanja nastala procesom zavarivanja te lokalno povećavanje vlačne čvrstoće materijala na mjestu HFMI obrade. Za razliku od AW detalja, čvrstoća čelika sudjeluje u doprinosu otpornosti na umor obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru, što je posebice znatno prilikom korištenja čelika visoke čvrstoće.
2. Prikupljanjem i statističkom analizom dostupnih podataka cikličkih ispitivanja LA i TA detalja obrađenih HFMI metodom, uočeno je da je LA detalj ima kraći životni vijek kod umora u odnosu na TA detalj. Također je uočen trend povećanja životnoga vijeka obrađenih zavarenih detalja povećanjem granice popuštanja čelika, trend smanjenja otpornosti na umor povećanjem debljine elementa te povećanje otpornosti na umor smanjenjem omjera naprezanja, R .
3. Numeričkim proračunom faktora koncentracije naprezanja, gdje je za izračun koncentracije naprezanja prije i nakon HFMI tretmana korištena stvarna geometrija za pregled i definiranje idealizirane geometrije, obzirom na prikazane rezultate može se zaključiti da TA detalji imaju nižu koncentraciju naprezanja od LA detalja. Rezultati proračuna ukazuju i na to da se HFMI obradom značajno smanjuje faktor koncentracije naprezanja na rubu zavora. Faktor koncentracije naprezanja kod LA detalja u AW stanju iznosi $K_{t,LA-AW} = 3,33$, dok u HFMI obrađenom stanju $K_{t,LA-HFMI} = 2,64$. U slučaju TA detalja, faktor koncentracije naprezanja u AW stanju iznosi $K_{t,TA-AW} = 2,25$, dok u HFMI obrađenom stanju $K_{t,TA-HFMI} = 1,94$.

4. Zaostala napreznja na rubu zavara detalja izrađenih od S355J2+N i S690QL su mjerena metodom rendgenske difrakcije. Vrijednosti zaostalih napreznja na HFMI obrađenim rubovima zavara značajno su niže u usporedbi s AW rubovima zavara, što ukazuje na to da su HFMI obradom unesena značajna zaostala tlačna napreznja koja umanjuju vlačna napreznja nastala procesom zavarivanja. Smanjenje zaostalih napreznja uočeno je i kod detalja izrađenih od čelika S355J2+N i S690QL, međutim, negativna zaostala napreznja izraženija su kod detalja izrađenih od čelika S690QL, koji imaju veću vlačnu čvrstoću. Dakle, zaključuje se da čelik veće vlačne čvrstoće ima veća tlačna zaostala napreznja nakon HFMI obrade, što povoljno utječe na životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru izrađenih od čelika visoke čvrstoće.
5. Tvrdća na rubu zavara AW i HFMI obrađenih detalja mjerena je prijenosnim tvrdomjerom. Rezultati ispitivanja pokazuju da HFMI metoda značajno povećava tvrdoću na mjestu obrade, a samim time i lokalnu vlačnu čvrstoću na rubu zavara. Prosječno povećanje tvrdoće na mjestu HFMI obrade iznosi oko 38% za detalje izrađene od čelika S355J2+N i oko 61% za detalje izrađene od čelika S690QL. Također, kod detalja izrađenih od čelika S690QL uočena je veća raspršenost podataka. Dakle, zaključuje se da je kod čelika veće vlačne čvrstoće veće i povećanje tvrdoće na rubu zavara, što kao jedan od HFMI parametara poboljšanja utječe i na životni vijek zavarenih detalja izloženih umoru.
6. Provedena su opsežna ciklička ispitivanja navedenih uzoraka pri konstantnim amplitudama sve do njihova otkazivanja. Rezultati cikličkih ispitivanja ukazuju na značajno povećanje životnoga vijeka HFMI obrađenih zavarenih detalja izloženih umoru. Rezultati također pokazuju da su TA detalji povoljniji za produljenje životnog vijeka od LA detalja. Iako su uzorci i zavari izvedeni što je moguće sličnije, a ispitivanje provedeno u laboratorijskim (identičnim) uvjetima, uočava se raspršenje u rezultatima. HFMI obrađeni detalji pokazuju veće raspršenje životnoga vijeka u odnosu na AW detalje. Ovo nastaje zbog različitih materijalnih i geometrijskih svojstava koji utječu na životni vijek kod umora.
7. Kako bi se odredio kraj perioda nastanka i početak perioda širenja pukotine, provedena je analiza maksimalnih pomaka čeljusti preše prilikom cikličkih ispitivanja detalja, gdje je usvojena metoda procjene perioda nastanka i širenja tehničke pukotine. Navedena

pretpostavka je potvrđena analizom fotografija ruba zavara koje su snimane tijekom ispitivanja te se zaključuje da predložena metoda može s dovoljnom preciznošću procijeniti periode nastanka i širenja tehničke pukotine. Pokazano je da kod LA-AW detalja period nastanka pukotine iznosi prosječno 74,7% od ukupnoga životnoga vijeka, a kod LA-HFMI detalja udio perioda nastanka tehničke pukotine iznosi 99,0% ukupnoga životnoga vijeka. U slučaju TA-AW detalja, period nastanka pukotine iznosi prosječno 86,4% od ukupnog životnoga vijeka, a u slučaju TA-HFMI detalja, prosječni udio perioda nastanka pukotine iznosi 97,7% od ukupnoga životnoga vijeka detalja. Može se zaključiti se da HFMI metoda ima značajan utjecaj na produljenje perioda nastanka pukotine.

8. Kombinacijom metoda koje obuhvaćaju periode nastanaka i širenja pukotine kod umora, razvijen je deterministički proračunski model koji omogućuje proračun životnoga vijeka AW i HFMI obrađenih zavarenih detalja čeličnih konstrukcija. Na temelju izmjerenih i proračunatih geometrijskih i materijalnih parametara te HFMI parametara poboljšanja, provedena je precizna kalibracija modela, a rezultati proračuna su potvrđeni rezultatima cikličkih ispitivanja. Uočeno je da se rezultati kalibriranog TSM modela dobro slažu s rezultatima cikličkih ispitivanja promatranih AW i HFMI obrađenih detalja, čime je potvrđena prva hipoteza (H1) koja kaže da je kombinacijom metoda koje obuhvaćaju period nastanaka i širenja pukotine kod umora moguće je razviti model koji će omogućiti izračun životnoga vijeka zavarenih detalja čeličnih konstrukcija obrađenih metodom mehaničkoga udara visokom frekvencijom.
9. Iz prikazanih rezultata proračuna determinističkim TSM modelom, zaključuje se da je TA detalj povoljniji iz aspekta umora u odnosu na LA detalj. Rezultati pokazuju značajno povećanje ukupnog životnog vijeka HFMI u usporedbi s AW detaljima. Prema rezultatima proračuna i cikličkih ispitivanja, zaključuje se da granica popuštanja materijala detalja u AW stanju nema značajan utjecaj na otpornost na umor, dok se kod HFMI obrađenih detalja uočava znatno povećanje otpornosti na umor kod detalja istog tipa. Ovo je vidljivo i iz prikazanih koeficijenata povećanja otpornosti koji za S355J2+N detalje iznose oko 1,59 – 1,66, dok u slučaju S690QL detalja ti koeficijenti iznose 1,88 – 1,91.

10. Kako bi se u obzir uzele geometrijske i materijalne neizvjesnosti na strani otpornosti na umor, razvijen je stohastički TSM model gdje se Monte Carlo simulacijom na temelju kalibriranog determinističkoga TSM modela dobivaju simulacije za više razlika napreznja. Uočava se da stohastički TSM model uzimanjem u obzir neizvjesnosti na strani otpornosti daje konzervativnije rezultate u odnosu na deterministički model. Također, uzimajući u obzir neizvjesnosti na strani otpornosti, stohastički model daje rezultate veće pouzdanosti. Na taj način je potvrđena i druga hipoteza (H2), koja glasi da će razvijeni stohastički model, koji u sebi sadrži neizvjesnosti parametara poboljšanja metode mehaničkoga udara visokom frekvencijom, omogućiti pouzdanu procjenu životnoga vijeka kod umora obrađenih zavarenih detalja. U slučaju čelika više čvrstoće, stupanj povećanja karakterističnih otpornosti dobivenih determinističkim i stohastičkim TSM modelom je približno jednak kod LA detalja (1,67 za čelik S355J2+N te 1,68 za čelik S690QL), dok je u slučaju TA detalja stupanj povećanja niži kod S690QL detalja (1,79 u odnosu na detalje od čelika S355J2+N gdje faktor povećanja otpornosti iznosi 1,91). Nadalje, kako bi se dobila šira slika za različite geometrije detalja, odnosno, mogući raspon faktora koncentracije napreznja unutar pojedinog tipa detalja, provedena je parametarska analiza. Rezultati ukazuju na to da kod AW detalja razlika u faktoru koncentracije napreznja za pojedini detalj nema značajnu ulogu u promjeni otpornosti detalja na umor, što kod HFMI obrađenih detalja nije slučaj. Širi raspon faktora koncentracije napreznja utječe značajnije na samu otpornost AW detalja (1,06 MPa do 1,71 MPa), dok je moguća razlika u karakterističnoj otpornosti na umor HFMI detalja značajna i iznosi od 10,56 MPa do 22,57 MPa.

8.3 Preporuke za daljnja istraživanja

Nakon provedbe ovog istraživanja došlo se do relevantnih spoznaja o otvorenim pitanjima vezano uz:

- U okviru ovoga istraživanja, deterministički i stohastički modeli su kalibrirani za LA i TA detalje. U daljnjem istraživanju se mogu provesti ispitivanja i analize u svrhu kalibracije TSM modela i za druge detalje izložene umoru poput, primjerice, sučelnog zavarava (*engl. butt weld*) i/ili pokrovne ploče (*engl. cover plate*).
- TSM model je moguće dodatno unaprijediti na način da se u procjenama životnoga vijeka kod umora u obzir uzme i potencijalno opuštanje zaostalih naprezanja nakon djelovanja određenog pojedinačnog statičkog naprezanja blizu granice popuštanja promatranog materijala, čime se može umanjiti pozitivan učinak HFMI metode. Pri tome je potrebno provesti dodatna mjerenja zaostalih naprezanja prije i nakon njihova opuštanja. Na taj način bi se detaljnije istražio stupanj produljenja životnoga vijeka kod umora i u ovom slučaju.
- TSM model je razvijen i kalibriran za proračun AW i HFMI obrađenih zavarenih čeličnih detalja izloženih umoru pri konstantnim amplitudama. U daljnjem istraživanju se TSM model može proširiti na način da omogućuje procjenu umora pri cikličkim naprezanjima promjenjivih amplituda.
- Dosadašnja istraživanja su pokazala korist HFMI metode u povećanju čvrstoće kod umora pri konstantnim amplitudama i niskom omjeru naprezanja, R. Iako je poznato da se povećanjem omjera naprezanja smanjuje životni vijek HFMI obrađenih detalja, ograničeno je znanje o utjecaju visokih omjera naprezanja, posebice pri cikličkim naprezanjima promjenjivih amplituda.
- Potrebno je također dodatno istražiti i ujednačiti pouzdanost zavarenih detalja obrađenih HFMI metodom te izloženih umoru konstantnih i promjenjivih amplituda naprezanja.

POPIS LITERATURE

- [1] MPR News. <https://www.mprnews.org/story/2017/08/01/looking-back-photos-of-the-bridge-collapse>, pristupljeno: 17.04.2019.
- [2] Kühn, B. Assessment of Existing Steel Structures – Recommendations for Estimation of the Remaining Fatigue Life. *Procedia Engineering*, 66, 3-11, 2013, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.057>
- [3] Oehme, P. Damage analysis of steel structures. *Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, P-139/89, Zürich, Switzerland, 1989.
- [4] Yongji, S.; Zegan, C.; Yenman, Y. Fatigue failures of steel railway bridges in China. *IABSE reports*, 37, 1982. <https://doi.org/10.5169/seals-28950>
- [5] Ledeczki, Á.; Hay, T.; Volgyesi, P.; Hay, D.R.; Nadas A.; Jayaraman, S. Wireless Acoustic Emission Sensor Network for Structural Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 9, 11, 1370-1377, 2009. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2019315>
- [6] Guilherme A.; de Jesus, A.; da Silva, J.G.S.; Calçada, R.; Fatigue cracking of welded railway bridges: A review. *Engineering Failure Analysis*, 104, 2019, 154-176, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.037>
- [7] Haghani, R.; Al-Emrani, M.; Heshmati, M. Fatigue-Prone Details in Steel Bridges. *Buildings*. 2, 456-476, 2012. <https://doi.org/10.3390/buildings2040456>
- [8] Lotsberg, I. Fatigue capacity of load carrying fillet-welded connections subjected to axial and shear loading. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 131, 4, 1–9, 2009. <https://doi.org/10.1115/1.3160531>
- [9] Hobbacher, A. Fatigue design of welded joints and components. IIW Joint Working Group XIII–XV, Woodhead Publishing Ltd; 1996. <https://doi.org/10.1533/9780857093189>
- [10] Yıldırım, H.C. Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints. *Int. J. Fatigue* 2017, 101, 408–420, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.10.026>
- [11] Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document IIW-2259-15, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>

-
- [12] American Bureau of Shipping: Commentary on the guide for the fatigue assessment of offshore structures, 2004.
- [13] Recommended practice Det Norske Veritas, DNV-RP-C203 fatigue design of offshore steel structures, 2016.
- [14] British Standards Institute. Steel, concrete and composite bridges: Part 10 – Code of practice for fatigue, London: BSI, 1980.
- [15] Marquis, G.B.; Barsoum, Z. IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Collection, Springer, Singapore, (2016). https://doi.org/10.1007/978-981-10-2504-4_1
- [16] Mikkola, E. A study on effectiveness limitations of High-Frequency Mechanical Impact. Doctoral Dissertation, Aalto University, Espoo, Finland, 2016.
- [17] Fuštar B.; Lukačević, I.; Dujmović, D. Review of fatigue assessment methods for welded steel structures Fatigue of welded joints. Hindawi Advances in Civil Engineering, 2018:1–382018, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3597356>.
- [18] Fuštar, B.; Lukačević, I.; Dujmović, D. High Frequency Mechanical Impact treatment of welded joints. Gradjevinar, 72, 421-436, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2822.2019>.
- [19] Siemens DIWS. <https://community.sw.siemens.com/s/article/history-of-fatigue>. Pristupljeno: 14.6.2020.
- [20] Schütz, W. A history of fatigue. Engineering Fracture Mechanics, 54, 2, 263–300, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6)
- [21] Mann, J.Y. Bibliography on the fatigue of materials. Components and Structures, 1–4, Pergamon Press, Oxford, UK, 1990.
- [22] Cui, W. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. Journal of Marine Science and Technology, 7, 1, 43–56, 2002.
- [23] Schijve, J. Fatigue of Structures and Materials. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2004.
- [24] Forsyth, P.J.E. The Physical Basis of Metal Fatigue. American Elsevier Pub. Co., New York, USA, 1969.
- [25] Hobbacher, A.F. New developments at the recent update of the IIW recommendations for fatigue of welded joints and components. Steel Construction, 3, 4, 231–242, 2010. <https://doi.org/10.1002/stco.201010030>.
- [26] Kainuma, S.; Jeong, Y. S.; Yang, M.; Inokuchi, S. Welding residual stress in roots between deck plate and U-rib in orthotropic steel decks. Measurement, 92, 475–482, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.040>
-

-
- [27] Radaj, D.; Sonsino, C.M.; Fricke, W. *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. 2nd Edition. Abington, Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- [28] Kolstein, M.H. *Fatigue Classification of Welded Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks*. Ph.D. thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, Netherlands, 2007.
- [29] Xiao, Z.; Yamada K.; Inoue, J.; Yamaguchi, K. Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck. *Int. J. Fatigue*, 28, 4, 409–416, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.017>
- [30] Aygül, M., Al-Emrani, M.; Urushadze, S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM. *Int. J. Fatigue*, 40, 129–142, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.12.015>.
- [31] Zhou, H.; Wen, J.; Wang, Z.; Zhang, Y.; Du, X. Fatigue crack initiation prediction of cope hole details in orthotropic steel deck using the theory of critical distances. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 39, 9, 1051–1066, 2016. <https://doi.org/10.1111/ffe.12402>
- [32] Shan, C.; Y. Yi. Stress concentration analysis of an orthotropic sandwich bridge deck under wheel loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 488–494, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.011>.
- [33] Dahle, T. Design fatigue strength of TIG-dressed welded joints in high-strength steels subjected to spectrum loading. *Int J Fatigue*, 20, 677-681, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00031-0).
- [34] Huther, I.; Lieurade, H.P.; Souissi, R.; Nussbaumer, A.; Chabrolin, B.; Janosch, J.J. Analysis of results on improved welded joints. *Weld World*, 37, 5, 242-266, 1996.
- [35] Haagensen, P.J.; Maddox, S.J. *IIW Recommendations On Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints: IIW-2142-110.*; Woodhead Publishing: Cambridge, England, 2013; ISBN 978-1-78242-065-1.
- [36] Statnikov, E.S.; Shevtsov, U.M.; Kulikov, V.F. Ultrasonic impact tool for welds strengthening and reduction of residual stresses. *Publications Scientific Works: Metallurgy, SEVMASH, USSR*, 92, 27-29, 1977.
- [37] Zhao, X.; Wang, D.; Huo, L. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment. *Mater Des*, 32, 88-96, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.030>
-

-
- [38] Wang, T; Wang, D.; Huo, L.; Zhang Y. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *Int. J. Fatigue*, 31, 644–650, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.03.030>
- [39] Roy, S.; Fisher, J.W.; Yen, B.T. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT). *Int. J. Fatigue*, 25, 1239-1247, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00151-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00151-8).
- [40] Lihavainen, V.M.; Marquis, G.; Statnikov, E.S. Fatigue strength of a longitudinal attachment improved by ultrasonic impact treatment. *Weld World*, 48, 67-73, 2004. <https://doi.org/10.1007/BF03266434>
- [41] Leitner, M.; Stoschka, M.; Eichlseder, W. Fatigue enhancement of thin-walled, high-strength steel joints by High-Frequency Mechanical Impact treatment. *Weld World* 58, 29–39, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0097-4>
- [42] Bousseau, M.; Millot, T. Fatigue life improvement of welded structures by ultrasonic needle peening compared to TIG dressing. *IIW Doc XIII-2125-06*, 2006.
- [43] Walbridge, S. A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures EPFL Phd Thesis No. 3330, Wampler, 2005.
- [44] Fuštar, B.; Lukačević, I.; Skejić, D.; Lukić, M. Two-Stage Model for Fatigue Life Assessment of High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treated Welded Steel Details. *Metals* 2021, 11, 1318. <https://doi.org/10.3390/met11081318>
- [45] Ghahremani, K.; Walbridge, S.; Topper, T. High cycle fatigue behaviour of impact treated welds under variable amplitude loading conditions. *Int J Fatigue*, 81, 128-142, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.022>
- [46] Vilhauer, B.; Bennett, C.R.; Matamoros, A.B.; Rolfe, S.T. Fatigue behavior of welded coverplates treated with Ultrasonic Impact Treatment and bolting, *Eng Struct*, 34, 163-72, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.009>
- [47] Roy, S.; Fisher, J.W. Modified AASHTO design S-N curves for post-weld treated welded details. *Bridge Structures*, 2006, 207–22. <https://doi.org/10.1080/15732480601103630>
- [48] Deutscher Ausschuss für Stahlbau - Fatigue design of welded joints subjected to High Frequency Mechanical Impact Treatment - DAST- Guideline, 2019.
- [49] ISO 5817:2006; Welding–Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections, 2006.
-

-
- [50] Tehrani Yekta, R.; Ghahremani K.; Walbridge S. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds. *Int. J. Fatigue* 55:245–56, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.023>
- [51] 21. AASHTO LRFD bridge construction specifications Chapter 11.9 ultrasonic impact treatment, 3rd Ed, American association of state highway and transportation officials: LRFD bridge design specifications, Washington, D.C., 2010.
- [52] Marquis, G. Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds, *Eng Fract Mech*, 77, 2051-2062, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.03.034>
- [53] Applied Ultrasonics, Esonix UIT application guide: Post weld treatment for fatigue enhancement carbon steel welded structures. Alabama, USA, 2006.
- [54] Tilly, G.P.; Jackson, P.A.; Maddox S.J.; Henderson, R. Fatigue strengthening of welds in light rail structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, 163, 3, 147-152, 2010.
- [55] Kudryavtsev, Y.F.; Trufyakov, V.I.; Mikheev, P.; Burenko, A.G. Ultrasonic impact tool for welds strengthening and reduction of residual stresses, *Int Inst Weld, IIW Doc XIII*, 1596-94, 1993.
- [56] Harati, E.; Svensson, L.; Karlsson, L.; Hurtig, K. Effect of HFMI treatment procedure on weld toe geometry and fatigue properties of high strength steel welds, *Procedia Struct Integr*, 2, 3483-3490, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.434>.
- [57] BS 7910. BSI Standards Publication Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BSI Standards Publication, 2015.
- [58] Pilkey, Walter D.; Pilkey, Deborah F. *Peterson's Stress Concentration Factors*, 3rd Edition, Wiley, New Jersey, 2008.
- [59] Perez, I.; Madariaga, A.; Arrazola, P.J.; Cuesta, M.; Soriano, D. An analytical approach to calculate stress concentration factors of machined surfaces. *Int J Mech Sci*, 190:106040, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2020.106040>.
- [60] Leitner, M.; Ottersböck, M.; Pußwald, S.; Remes, H. Fatigue strength of welded and high frequency mechanical impact (HFMI) post-treated steel joints under constant and variable amplitude loading. *Eng Struct* 163, 215–223, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.041>.
- [61] Yildirim, H.C.; Marquis, G.B. Notch stress analyses of high-frequency mechanical impact-improved welds by using $\rho_f = 1$ mm and $\rho_f = \rho + 1$ mm approaches. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 37, 561–569, 2014. <https://doi.org/10.1111/ffe.12139>.
-

-
- [62] Yıldırım, H.C.; Marquis, G.B. A round robin study of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints subjected to variable amplitude loading. *Weld. World* 2013, 57, 437–447. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0045-3>.
- [63] Drvar, N. Comparison of the methods for shape and deformation determination of the mechanical structures. Master's thesis, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering, Zagreb, Croatia, 2004.
- [64] Ghahremani, K.; Safa, M.; Yeung, J.; Walbridge, S.; Haas, C.; Dubois, S. Quality assurance for high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment of welds using handheld 3D laser scanning technology, *Weld World*, 59 391-400, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0210-3>
- [65] Fuštar, B.; Lukačević, I.; Skejić, D.; Gašparović, M. Fatigue tests of as-welded and HFMI treated S355 details with longitudinal and transverse attachments // *Welding in the World*, 66 (2022), 12; 2549-2561 doi:10.1007/s40194-022-01357-7
- [66] Yıldırım, H.C.; Remes, H.; Nussbaumer, A. Fatigue properties of as-welded and post-weld-treated high-strength steel joints: The influence of constant and variable amplitude loads. *Int. J. Fatigue*, 138, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105687>
- [67] Leitner, M. Influence of effective stress ratio on the fatigue strength of welded and HFMI-treated high-strength steel joints. *Int J Fatigue*, 102, 158-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.008>.
- [68] Cheng, X.; Fisher, J.W.; Prask, H.J.; Gnäupel-Herold, T.; Yen, B.T.; Roy, S. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures, *Int J Fatigue*, 25, 1259-1269, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.020>.
- [69] Turski, M.; Clitheroe, S.; Evans, A.D.; Rodopoulos, C.; Hughes, D.J.; Withers, P.J. Engineering the residual stress state and microstructure of stainless steel with mechanical surface treatments, *Appl Phys A Mater Sci Process*, 99, 549-556, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5672-6>.
- [70] Liu, C.; Ge, Q.; Chen, D.; Gao, F.; Zou, J. Residual stress variation in a thick welded joint after ultrasonic impact treatment, *Sci Technol Weld Join*, 21 624-631, 2016. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1149932>.
- [71] Foehrenbach, J.; Hardenacke, V.; Farajian, M. High frequency mechanical impact treatment (HFMI) for the fatigue improvement: numerical and experimental investigations to describe the condition in the surface layer, *Weld World*, 60, 749-755, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0338-4>.
-

-
- [72] Dekhtyar, A.I.; Mordyuk, B.N.; Savvakina, D.G.; Bondarchuk, V.I.; Moiseeva, I.V.; Khripta, N.I. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment, *Mater Sci Eng A*, 641, 348-359, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.072>
- [73] Weich, I.I. Henry Granjon Prize Competition 2009 Winner Category C: "Design and Structural Integrity" EDGE Layer Condition and Fatigue Strength of welds improved by mechanical post-weld treatment. *Weld World*, 55, 3-12, 2011. <https://doi.org/10.1007/bf03263510>.
- [74] Okawa, T.; Shimanuki, H.; Funatsu, Y.; Nose T.; Sumi, Y. Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment. *Weld World* 57, 235–241, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40194-012-0018-y>
- [75] Weich, I.; Ummenhofer, T.; Nitschke-Pagel, T.; Chalandar, H.E.; Dilger, K. Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments. *Weld World*, 53, 2009. <https://doi.org/10.1007/BF03263475>
- [76] Sonsino, C.M. Effect of residual stresses on the fatigue behaviour of welded joints depending on loading conditions and weld geometry, *Int J Fatigue*, 31, 88-101, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015>.
- [77] Ghahremani, K.; Walbridge, S. Fatigue testing and analysis of peened highway bridge welds under in-service variable amplitude loading conditions. *Int J Fatigue*, 33, 300-312, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.09.004>.
- [78] McClung, R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 30, 173-205, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x>.
- [79] Ishikawa, T.; Shimizu, M.; Tomo, H.; Kawano, H.; Yamada, K. Effect of compression overload on fatigue strength improved by ICR treatment. *Int J Steel Struct*, 213, 175-181, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13296-013-1016-7>.
- [80] Abdullah A.; Malaki M.; Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Materials and Design*, 38, 7–18, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.040>
- [81] Khurshid, M.; Leitner, M.; Barsoum, Z.; Schneider, C. Residual stress state induced by high frequency mechanical impact treatment in different steel grades - Numerical and experimental study. *Int J Mech Sci*, 123, 34-42, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.027>.
-

-
- [82] Zheng, J.; Ince, A.; Tang, L. Modeling and simulation of weld residual stresses and ultrasonic impact treatment of welded joints, *Procedia Eng.*, 213, 36-47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.005>.
- [83] Guo, C.; Wang, Z.; Wang, D.; Hu, S. Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models. *Appl Surf Sci*, 347 596-601, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.128>
- [84] Mordyuk, B.N.; Iefimov, M.O.; Prokopenko, G.I.; Golub, T.V.; Danylenko, M.I. Structure, microhardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening. *Surf Coatings Technol*, 204, 1590-1598, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.009>.
- [85] Guo, J.; Fu, H.; Pan, B.; Kang, R. Recent progress of residual stress measurement methods: A review. *CJA*, 34, 54–78, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010>.
- [86] Zhang, H.; Wang, D.; Xia, L.; Lei, Z.; Li, Y. Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints. *Int J Fatigue*, 80, 278-287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017>
- [87] Herrmann, K. *Hardness testing - principles and applications*, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2011.
- [88] Schubnell, J.; Eichheimer, C.; Ernould, C.; Maciolek, A.; Rebelo-Kornmeier, J.; Farajian, M. The influence of coverage for high frequency mechanical impact treatment of different steel grades. *J. Mater. Process. Technol.* 277, 116437, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116437>
- [89] Schubnell, J.; Pontner, P.; Wimpory, R.C.; Farajian, M.; Schulze, V. The influence of work hardening and residual stresses on the fatigue behavior of high frequency mechanical impact treated surface layers. *Int. J. Fatigue* 134, 105450, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105450>
- [90] European Committee for Standardization (CEN). *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1–9: Fatigue (EN 1993-1-9:2005)*; CEN: Brussels, Belgium, 2005.
- [91] Lassen, T.; Recho, N. *Fatigue Life Analyses of Welded Structures*. London: Iste, 2006. <https://doi.org/10.1002/9780470612149>
- [92] Downing, S.D.; Socie, D.F. Simple rainflow counting algorithms. *Int J Fatigue*, 4 31-40, 1982. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(82\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0142-1123(82)90018-4).
- [93] Nussbaumer, A.; Borges, L.; Davaine, L. *Fatigue Design of Steel and Composite Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-9 - Fatigue/Eurocode 4: Design*
-

-
- of Composite Steel and Concrete Structures, 2018
<https://doi.org/10.1002/9783433608791>.
- [94] Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue, *J Appl Mech*, 12, 159-64, 1945.
- [95] Shams Hakimi, P.; Al-Emrani, M. Post weld treatment Implementation on bridges with special focus on HFMI. Chalmers University of Technology, 2014.
- [96] Hobbacher A. Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, France, 2008.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>.
- [97] Shams-Hakimi, P.; Yildirim, H.C.; Al-Emrani, M. The thickness effect of welded details improved by high-frequency mechanical impact treatment, *Int J Fatigue*, 99, 111-124, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.02.023>
- [98] Lotsberg, I. Assessment of the size effect for use in design standards for fatigue analysis. *Int. J. Fatigue*, 66, 86–100, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.012>.
- [99] Fricke W. Recent developments and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(7), 1224-1239, 2015.
<https://doi.org/10.1177/0954406214550015>.
- [100] Ghahremani, K.; Ranjan, R.; Walbridge, S.; Ince, A. Fatigue Strength Improvement of Aluminum and High Strength Steel Welded Structures using High Frequency Mechanical Impact Treatment, *Procedia Eng*, 133, 465-476, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.616>.
- [101] Yildirim, H.C.; Marquis, G.B. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact. *Int J Fatigue*, 44, 168-176, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.002>.
- [102] Mikkola, E.; Doré, M.; Khurshid, M. Fatigue strength of HFMI treated structures under high R-ratio and variable amplitude loading, *Procedia Eng.*, 66, 161-170, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.071>.
- [103] Dijkstra, O.D.; de Back, J. Fatigue strength of tubular T- and X-joints. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 1980.
- [104] Det Norske Veritas (DNVGL) Classification Note 30.7. Fatigue Assessment of Ship Structures, 2014.
- [105] Bäckström, M. Multiaxial Fatigue Life Assessment of Welds Based on Nominal and Hot Spot Stresses. VTT Publications, 502, Espoo, Finland, 2003.
-

-
- [106] Savaidis, G.; Vormwald, M. Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded structural connections supported by finite element analysis. *Int. J. Fatigue*, 22, 2, 85–91, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00119-X).
- [107] Niemi E.; Fricke W.; Maddox, S.J. *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide*. IIW Document 13, 2006. <https://doi.org/10.1533/9781845696665>.
- [108] Lukačević I., Fuštar B., Dujmović D. Fatigue life assessment of welded cover plate by using global and local approaches, *CE papers*, 1, 4, 468-476, 2017. <https://doi.org/10.1002/cepa.546>.
- [109] Fricke, W. Recommended Hot Spot analysis procedure for structural details of FPSOs and ships based on round-robin FE analyses. *Proceedings of the 11th International Offshore Polar Engineering Conference*, 12, 1, 40–47, Stavanger, Norway, 2001.
- [110] Xiao, Z. G.; K. Yamada. A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints. *Int. J. Fatigue*. 26, 12, 1277–1293, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.05.001>.
- [111] Deng, C.; Liu, Y.; Gong, B.; Wang, D. Numerical implementation for fatigue assessment of butt joint improved by high frequency mechanical impact treatment: A structural hot spot stress approach. *Int J Fatigue*, 92 211-219, 2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.008>.
- [112] Deng, C.; Niu, Y.; Gong, B.; Liu, Y.; Wang D. Numerical assessment of fatigue design curve of welded T-joint improved by high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment. *Adv Eng Softw*, 114, 154-162, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.06.017>
- [113] Sonsino, C.M.; Fricke, W.; De Bruyne, F.; Hoppe, A.; Ahmadi, A.; Zhang, G. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints - Background and applications. *Int J Fatigue*, 34, pp. 2-16, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.04.011>
- [114] Fricke, W. Fatigue strength assessment of local stresses in welded joints. *Fract Fatigue Welded Joints Struct*, 115-138, 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857092502.2.115>
- [115] Fricke, W. IIW recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis: IIW-2006-09, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857098566.3>
- [116] Hobbacher, A.F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated, *Int J Fatigue*, 31 50-58, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.002>
-

-
- [117] European Committee for Standardization—Technical Committee 250 (CEN/TC 250). Eurocode 3: Design of Steel Structures (prEN 1993-1-9 Final Draft: 2020); CEN/TC 250: Brussels, Belgium, 2020.
- [118] Peterson, R.E.: Notch sensitivity, Metal Fatigue, New York, McGraw Hill, 293-306, 1959.
- [119] Neuber, H. Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion, 20, 245–251, 1968.
- [120] Radaj, D. Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 1990.
- [121] Seeger, T. Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise (Stahlbau Handbuch); Stahlbau-Verlagsges: Köln, Germany, 1996.
- [122] Lihavainen, V.M.; Marquis, G. Estimation of fatigue life improvement for ultrasonic impact treated welded joints. Steel Res. Int. 77, 896–900, 2006. <https://doi.org/10.1002/srin.200606478>
- [123] Atzori, B.; Lazzarin, P. Notch sensitivity and defect sensitivity under fatigue loading: Two sides of the same medal. Int. J. Fract. 107, 1–8, 2001. <http://doi.org/10.1023/A:1007686727207>
- [124] Glinka, G. Energy density approach to calculation of inelastic strain-stress near notches and cracks. Eng. Fract. Mech. 22, 485–508, 1985. [http://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90148-1](http://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90148-1)
- [125] Röscher, S.; Knobloch, M. Towards a prognosis of fatigue life using a Two-Stage-Model: Application to butt welds. Steel Constr. 2019, 12, 198–208. <https://doi.org/10.1002/stco.201900018>.
- [126] Hobbacher, A. The use of fracture mechanics in the fatigue analysis of welded joints. In Fracture Fatigue Welded Joints Struct; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 91–112, 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857092502.1.91>
- [127] Hobbacher, A.F. Erratum to: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components; Springer: Cham, Switzerland, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2_8
- [128] Dowling, N.E. Mechanical Behavior of Materials : Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Englewood Cliffs, N.J. :Prentice Hall, 1993.
- [129] Baptista, C.; Reis, A.; Nussbaumer, A. Probabilistic S-N curves for constant and variable amplitude. Int. J. Fatigue, 101, 312–327, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.022>.
-

-
- [130] Neuber, H. Kerbspannungslehre: Grundlagen für Genaue Spannungsrechnung; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1937. <http://doi.org/10.1002/zamm.19380180213>
- [131] R. E. Peterson, Stress Concentration Factors, Wiley, New York, 1974.
- [132] Osgood, W.R. Description of Stress–Strain Curves by Three Parameters; National Advisory Committee for Aeronautics, Rep. 902; University of Washington Libraries: Washington, DC, USA, 1943.
- [133] Bauschinger, J. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken, Quetschen, Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Belastung’, Mitt Mech-Tech Lab, 13, Munich, 1886.
- [134] Masing, G. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing. In Proceedings of the 2nd International Congress for Applied Mechanics, Zurich, Switzerland, 12–17, 332–335, 1926.
- [135] Manson, S.S. Fatigue: A complex subject—Some simple approximations. *Experimental Mechanics* 5, 193–226, 1965. <https://doi.org/10.1007/BF02321056>
- [136] Coffin L.F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal’, *Trans ASME*, 76 (6), 931–950, 1954.
- [137] Coffin L.F. Fatigue in machines and structures – power generation. *Fatigue and Microstructure*, Materials Park, ASM, 1–27, 1979.
- [138] Chattopadhyay, M.R.; Glinka, G.; El-Zein, M.; Qian, D.; Formas, R. Stress Analysis and Fatigue of welded structures. *Welding in the World*, 55, 2013. <http://doi.org/10.1007/BF03321303>.
- [139] Hou, C.Y.; Charng, J.J. Models for the Estimation of Weldment Fatigue Crack Initiation Life. *Int. J. Fatigue*, 19, 537–541, 1997. [http://doi.org/10.1016/S0142-1123\(97\)00072-8](http://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00072-8)
- [140] Kim, K.S.; Chen, X.; Han, C.; Lee, H.W. Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading. *Int. J. Fatigue*, 24, 783–793, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00190-6)
- [141] Bäumel, A.; Seeger, T.; Boller, C. *Materials Data for Cyclic Loading. Supplement 1. Materials science monographs*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, Volume 3, 1990.
- [142] Korkmaz, S. Extension of the Uniform Material Law for High Strength Steels. Master’s Thesis, Bauhaus University Graduate School of Structural Engineering, Weimar, Germany, 2008.
- [143] Roessle, M.L.; Fatemi, A. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations. *Int. J. Fatigue*, 22, 495–511, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00026-8)
-

-
- [144] British Standards Institution, Guidance on Methods for the Acceptance of Flaws in Structure, PD 6493, BS 7910, Appendix J, 2005.
- [145] Chryssanthopoulos, M.K.; Righiniotis, T.D. Fatigue reliability of welded steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 11, 2006, 1199-1209, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.007>
- [146] Ye, X., Su, Y., Han, J. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Assessment of Steel Bridges, pp.1-13, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/956473>
- [147] Zhao, Z.; Haldar, A.; Breen, F.L. Fatigue-Reliability Evaluation of Steel Bridges. *Journal of Structural Engineering* 120, 1608–1623, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1994\)120:5\(1608\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1994)120:5(1608))
- [148] Byers, W.G.; Marley, M.J.; Mohammadi, J.; Nielsen, R.J.; Sarkani S. Fatigue Reliability Reassessment Procedures: State-of-the-Art Paper. *Journal of Structural Engineering* 123, 271–276, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(277)).
- [149] Byers, W.G.; Marley, M.J.; Mohammadi, J.; Nielsen, R.J.; Sarkani S. Fatigue Reliability Reassessment Procedures: State-of-the-Art Paper. *Journal of Structural Engineering* 123, 271–276, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(277)).
- [150] Dujmović, D.; Lukačević, I; Androić, B. Proračun konstrukcija prema EN 1990, Teorija i numerički primjeri. Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, 2020.
- [151] Ni, Y.Q.; Ye, X.W.; Ko, J.M. Monitoring-Based Fatigue Reliability Assessment of Steel Bridges : Analytical Model and Application. *Journal of Structural Engineering* 136, 1563–1573, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000250](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000250)
- [152] Kwon, K.; Frangopol, D.M.; Soliman, M. Probabilistic Fatigue Life Estimation of Steel Bridges by Using a Bilinear S-N Approach. *Journal of Bridge Engineering* 17, 58–70, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000225](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000225)
- [153] Soliman, M.; Frangopol, D.M.; Kwon, K. Fatigue Assessment and Service Life Prediction of Existing Steel Bridges by Integrating SHM into a Probabilistic Bilinear S-N Approach. *Journal of Structural Engineering* 139, 1728–1740, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000584](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000584)
- [154] Joint Committee Structural Safety. JCSS Probabilistic Model Code: Resistance Models, 1–19, 2013.
- [155] Zhao, Z.; Haldar, A. Bridge fatigue damage evaluation and updating using non-destructive inspections. *Engineering Fracture Mechanics*, 53, 775–788. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00136-0](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00136-0)
-

-
- [156] Lukić, M.; Cremona, C. Probabilistic Assessment of Welded Joints versus Fatigue and Fracture. *Journal of Structural Engineering*, 127, 211-218, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:2\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:2(211))
- [157] Righiniotis, T.D.; Chryssanthopoulos, M.K. Probabilistic fatigue analysis under constant amplitude loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 867–886, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00002-6)
- [158] Wang, C.S, Hao, L.; Fu, B.N. Fatigue Reliability Updating Evaluation of Existing Steel Bridges. *Journal of Bridge Engineering* 17, 955–965, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000354](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000354).
- [159] Walbridge, S. A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures (EPFL Phd Thesis No. 3330). Phd thesis, EPFL. Wampler, 2005.
- [160] Leander, J.; Aygül, M.; Norlin, B. Refined fatigue assessment of joints with welded in-plane attachments by LEFM. *Int. J. Fatigue*, 56, 25–32, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.07.013>
- [161] Yamada, K.; Nagatsu, S.; and Mitsugi, Y. Evaluation of scatter in fatigue life of welded details using fracture mechanics. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 6, 1, 13–21, 1989.
- [162] Lukačević, I.: Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [163] Kakavand, A.; Jennatabadi, A.G. Evaluation of experimental test results of High Frequency Mechanical Impact improved welded details. Chalmers University of Technology, Master's thesis, Gothenburg, Sweden 2016.
- [164] Sedlacek G, Hobbacher A, Schleich JB, Valtinat G, Nussbaumer A, Maddox SJ, et al. 1st Draft of the Background Document prEN 1993-1-9 - Adenda. 2004.
- [165] Huo, L.; Wang, D.; Zhang, Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load. *Int. J. Fatigue*, 27, 95–101, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.05.009>
- [166] Kim, I. Fatigue strength improvement of longitudinal fillet welded out-of-plane gusset joints using air blast cleaning treatment, *Int. J. Fatigue*, Volume 48, 289-299, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.11.010>.
- [167] Leitner, M.; Barsoum, Z.; Schäfers, F. Crack propagation analysis and rehabilitation by HFMI of pre-fatigued welded structures. *Weld World* 60, 581–592, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0316-x>
-

-
- [168] Haagensen, P.J.; Alnes, Ø. Progress Report on IIW WG2 Round Robin Fatigue Testing Program on 700 MPa and 350 MPa YS Steels. IIW Doc, XIII-2081-05; International Institute of Welding: Paris, France, 2005.
- [169] Ummenhofer, T.; Weich, I. REFRESH – Lebensdauererlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen. *Stahlbau*, 75, 605-607, 2006.
- [170] Vanrostenberghe, S.; Clarin, M.; Shin, Y.; Droesbeke, B.; Van der Mee, V.; Doré, M.; Marquis, G.; Parantainen, J.; Kannengiesser, T.; Barsoum, Z. Improving the fatigue life of high strength steel welded structures by post weld treatments and specific filler materials (FATWELDHSS), European Commission – Directorate – General for Research and Innovation, 2015. <https://doi.org/10.2777/705266>
- [171] Pedersen, M.M., Mouritsen, O.Ø., Hansen, M.R. et al. Comparison of Post-Weld Treatment of High-Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue. *Weld World*, 54, R208–R217, 2010. <https://doi.org/10.1007/BF03263506>
- [172] Haagensen, P.; Statnikov, E.; Lopez Martinez, L. Introductory Fatigue Tests on Welded Joints in High Strength Steel and Aluminium Improved by Various Methods Including Ultrasonic Impact Treatment (UIT), 13, 1998.
- [173] Lopez Martinez, Luis & Blom, Anders & H, Trogen & T, Dahle. Fatigue behavior of steels with strength levels between 350 and 900 MPa. - Influence of post-weld treatments under spectrum loading, 1997.
- [174] Mecseri, B.J.; Kövesdi, B. Discussion on the Hot-Spot and Notch Stress Based Fatigue Assessment Methods Based on Test Results. *International Journal of Steel Structures* 20, 1100–1114, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00345-1>
- [175] Tehrani Yekta, R. Acceptance Criteria for Ultrasonic Impact Treatment of Highway Steel Bridges. UWSpace, 2012. <http://hdl.handle.net/10012/6933>
- [176] Kudryavtsev, Y.; Kleiman, J.; Lugovskoy, A.; Lobanov, L.; Knysh, V.; Voitenko, O.; Prokopenko, G. Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening. *Weld World*, 51, 7–8, 47–53, 2007.
- [177] Deguchi, T.; Mouri, M.; Hara, J.; Kano, D.; Shimoda, T.; Inamura, F.; Fukuoka, T.; Koshio, K. Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening. *Journal of Marine Science and Technology*, 17, 3, 360–369, 2012.
- [178] Huo, L.X., Wang, D., Zhang, Y.F. and Chen, J.M. (2000) Investigation on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method. *Key Engineering Materials*, 183–187, 1315–1320, 2000.
-

-
- [179] Kuhlmann, U.; Bergmann, J.; Dürr, A.; Thumser, R.; Günther, H.P.; Gerth, U. Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren. *Stahlbau*, 74, 5, 358–365, 2005.
- [180] Trufiakov, V.I.; Statnikov, E.S.; Mikheev, P.P.; Kuzmenko, A.Z. The Efficiency of Ultrasonic Impact Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Document, 13, 1745-1798, 1998.
- [181] Ummenhofer, T.; Weich, I.I.; Nitschke-Pagel, T. Extension of Life Time of Welded Fatigue Loaded Structures. International Offshore and Polar Engineering Conference San Francisco, 98-105, California, USA, 2006.
- [182] Ermolaeva, N.S.; Hermans, M.J.M. Research on Post-weld Impact Treatments of High-strength Steel. International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, 410-417, Korea, 2014.
- [183] Shimanuki, H.; Okawa. Effect of stress ratio on the enhancement of fatigue strength in high performance steel welded joints by ultrasonic impact treatment. *International Journal of Steel Structures*, 2013, 13. <https://doi.org/10.1007/s13296-013-1014-9>.
- [184] Galtier, A.; Statnikov, E.S. The Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behavior of Welded Joints in High-Strength Steel. *Welding in the World*, 48, 5–6, 61–66, 2004.
- [185] Statnikov, E. S.; Muktepavel, V. O.; Blomqvist, A. Comparison of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) and Other Fatigue Life Improvement Methods. *Weld World*, 46, 3–4, 20–32, 2002.
- [186] Leitner, M.; Simunek, D.; Shah, S.F.; Stoschka, M. Numerical fatigue assessment of welded and HFMI-treated joints by notch stress/strain and fracture mechanical approaches. *Adv. Eng. Softw.* 2016, 120, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.022>
- [187] Dowling, N.E. Notched Member Fatigue Life Predictions Combining Crack Initiation and Propagation. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2, 129–138, 1979. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1979.tb01349.x>
- [188] Yıldırım, H.C.; Marquis, G.; Sonsino, C.M. Lightweight design with welded high-frequency mechanical impact (HFMI) treated high-strength steel joints from S700 under constant and variable amplitude loadings. *Int. J. Fatigue* 91, 466–474, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.009>

-
- [189] Suominen, L.; Khurshid, M.; Parantainen, J. Residual stresses in welded components following post-weld treatment methods. *Procedia Eng.* 66, 181–191, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.073>
- [190] METININVEST. <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/s690q>, pristupljeno: 20.01.2022.
- MPR News. <https://www.mprnews.org/story/2017/08/01/looking-back-photos-of-the-bridge-collapse>, pristupljeno: 17.04.2019.
- [191] Wohlfahrt, H. Auswirkungen mechanischer Oberflächenbehandlungen auf das Dauerschwingverhalten unter Einschluss von Rissbildung und Rissausbreitung. In *Mechanische Oberflächenbehandlungen*. Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 56–85, 2000.
- [192] European Standard EN 10204 Metallic products - Types of inspection documents, 2004, Technical Committee ECISS/TC 9, Technical conditions of delivery and quality control, 2004. <https://doi.org/10.4324/9781315780320-29>
- [193] Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 6. dio: Tehnički uvjeti isporuke za plosnate proizvode od konstrukcijskih čelika s visokom granicom razvlačenja u poboljšanome stanju (EN 10025-6:2019)
- [194] ISO 14175:2008: Welding consumables — Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [195] Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 1: Arc welding (ISO 15609-1:2019; EN ISO 15609-1:2019)
- [196] Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers (ISO 4063:2009, Corrected version 2010-03-01; EN ISO 4063:2010)
- [197] GOM Metrology – Atos 5. Pristupljeno: 19.3.2021. <https://www.gom.com/en/products/high-precision-3d-metrology/atos-5>
- [198] GOM Inspect, <https://www.gom.com/en/products/gom-inspectsuite>. Pristupljeno: 1.10.2021.
- [199] Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019; EN ISO 6892-1:2019), ISO/TC 164/SC 1
- [200] Testxpert – testing software. Pristupljeno: 2.4.2021. <https://www.zwickroell.com/accessories/testing-software/testxpert-ii>
-

-
- [201] S. Sarkani, S.; Mazzuchi, T.A.; Lewandowski, D.; Kihl, D.P. Runout analysis in fatigue investigation, *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 18, 2971-2980, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.08.026>.
- [202] Luhmann, T. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65(6), 558-569, 2010.
- [203] Percoco, G.; Lavecchia, F.; Salmerón, A. J. S. Preliminary study on the 3D digitization of millimeter scale products by means of photogrammetry. *Procedia CIRP*, 33, 257-262, 2015.
- [204] Jurjević, L.; Gašparović, M. 3D Data Acquisition Based on OpenCV for Close-range Photogrammetry Applications. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 377, 2017.
- [205] Woloszyk, K.; Bielski, P. M.; Garbatov, Y.; Mikulski, T.; Photogrammetry image-based approach for imperfect structure modelling and FE analysis. *Ocean Eng.* 223, 108665, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108665>.
- [206] Chen, B. Q.; Garbatov, Y.; Soares, C. G. Measurement of weld-induced deformations in three-dimensional structures based on photogrammetry technique. *J. Sh. Prod.* 27(2), 51-62, 2011.
- [207] Ottersböck, M.J.; Leitner, M.; Stoschka, M.; Maurer, W. Crack Initiation and Propagation Fatigue Life of Ultra High-Strength Steel Butt Joints. *App. Sci. (Switzerland)*, 9, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9214590>.
- [208] Rodríguez-Martín, M.; Lagüela, S.; González-Aguilera, D.; Rodríguez-Gonzálvez, P. Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction. *Optics & Laser Technology*. 73. 54-62, 2015.
- [209] Rodríguez-Martín, M.; Rodríguez-Gonzálvez, P.; Lagüela, S.; González-Aguilera, D. Macro-photogrammetry as a tool for the accurate measurement of three-dimensional misalignment in welding. *Autom. Constr.* 71, 189-197, 2016.
- [210] digiCamControl. <http://digidcamcontrol.com/>. Pristupljeno: 20.09.2021.
- [211] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS, User's Manual, Version 6.14; Dassault Systèmes Simulia Corp.: Providence, RI, USA, 2014.
- [212] Walbridge, S. A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures (EPFL Phd Thesis No. 3330). Phd thesis, EPFL, 2005.
- [213] Leander, J.; Aygül, M.; Norlin, B. Refined fatigue assessment of joints with welded in-plane attachments by LEFM. *Int. J. Fatigue*, 56, 25-32, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.07.013>
-

- [214] Yamada, K.; Shigetomi, H. Fatigue tests of welded details in long life region and fracture mechanics analysis. Proceedings of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., 6(1):23–30, 1989.
- [215] Yamada, K.; Nagatsu, S.; Mitsugi, Y. Evaluation of scatter in fatigue life of welded details using fracture mechanics. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 6(1):13–21, 1989.

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Urušavanje mosta I-35W u Minneapolis-u [1]	1
Slika 1.2. Primjeri zavarenih detalja u kojima otkazivanje umorom nastaje na mjestima nagle promjene geometrije (koncentracije naprezanja) [8]	3
Slika 1.3. Način postizanja visoke otpornosti na umor	4
Slika 1.4. Struktura istraživanja	11
Slika 2.1. Nesreća vlaka u Vesaillesu 1842. uzorkovana umorom materijala [19].....	17
Slika 2.2. Različite faze u životnom vijeku kod umora	18
Slika 2.3. Cikličko klizanje u kliznim trakama [23]	19
Slika 2.4. Klizne linije (lijevo) i otvorene mikropukotine (desno) [23]	20
Slika 2.5. Poprečni presjek mikropukotine [23]	21
Slika 2.6. a) Nesavršenosti unutar zavara, b) povećanje naprezanja na mjestu zavara [17] .	22
Slika 2.7. Utjecaj koncentracije naprezanja na čeličnu ploču izloženu umoru [8]	23
Slika 2.8. Utjecaj vlačne čvrstoće čelika na otpornost na umor [8].....	24
Slika 2.9. Mogućnosti obrade zavara obzirom na metode obrade umor [18]	25
Slika 2.10. Primjer HFMI uređaja i različitih dostupnih HFMI glava [15]	26
Slika 2.11. AW detalj prije (lijevo) i detalj nakon HFMI obrade (desno) [15]	27
Slika 2.12. a) HFMI obrada b) parametri HFMI poboljšanja otpornosti na umor [18].....	27
Slika 2.13. Zavareni detalji neprikladni za HFMI obradu – a),b),c),d)i prikladni – e),f),g),h) [15].....	28
Slika 2.14. Defekt nastao zbog nepravilnog oblika zavara [15].....	29
Slika 2.15. Defekt koji se očituje kroz tamne linije [15]	30
Slika 2.16. Pravilan presjek HFMI žlijeba (lijevo) i nepravilan profil HFMI (desno) [15]....	31
Slika 2.17. Kvantitativne mjere kontrole kvalitete HFMI obrade ruba zavara [15].....	32
Slika 2.18. Koncentracija naprezanja na mjestu zavara prije i nakon HFMI obrade.....	33
Slika 2.19. Različiti uvjeti naprezanja unutar zavarenoga detalja obzirom na stanje zaostalih naprezanja [68].....	35
Slika 2.20. Pregled metoda za mjerenje zaostalih naprezanja u materijalima.....	37
Slika 2.21. Pregled metoda za mjerenje tvrdoće metala	38
Slika 2.22. Definicije opterećenja i S-N krivulja zavarenih detalja.....	40
Slika 2.23. Palmgren-Miner-ova hipoteza linearne akumulacije oštećenja	41

Slika 2.24. <i>Nominalno naprezanje u komponenti oblika grede</i>	42
Slika 2.25. <i>S-N krivulje za normalne razlike naprezanja [90]</i>	43
Slika 2.26. <i>Karakteristične nominalne S-N krivulje za HFMI obrađene zavarene [15,96]</i>	44
Slika 2.27. <i>Ukupno stvarno naprezanje u Hot spot-u</i>	48
Slika 2.28. <i>Definicija Hot spot naprezanja [96]</i>	50
Slika 2.29. <i>Referentni radijusi za proračun Efektivnog naprezanja u zarezu [27]</i>	51
Slika 2.30. <i>Konstruktivski detalji obuhvaćeni u Dodatku F nove generacije EN 1993-1-9 [117]</i>	53
Slika 2.31. <i>Karakteristična S-N krivulja otpornosti HFMI obrađenoga zavarenoga detalja [117]</i>	53
Slika 2.32. <i>Koncept sličnosti za NS pristup [129]</i>	55
Slika 2.33. <i>Ukupna oštećenja za period nastanka pukotine [129]</i>	56
Slika 2.34. <i>Načini širenja pukotine kroz element</i>	58
Slika 2.35. <i>Tipična krivulja širenja pukotine [27]</i>	59
Slika 2.36. <i>Slučajni brojevi na primjeru funkcije raspodjele [150]</i>	61
Slika 3.1. <i>Primjer detalja s a) poprečnim (TA) i b) uzdužnim (LA) ukrućenjima</i>	66
Slika 3.2. <i>Linearna regresija s 50% i 95% vjerojatnosti preživljavanja [162]</i>	68
Slika 3.3. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za AW i HFMI obrađene LA i TA detalje</i>	71
Slika 3.4. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na granicu popuštanja f_y</i>	72
Slika 3.5. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene TA detalje u odnosu na granicu popuštanja f_y</i>	72
Slika 3.6. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na debljinu osnovne ploče, t</i>	73
Slika 3.7. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene TA detalje u odnosu na debljinu osnovne ploče, t</i>	73
Slika 3.8. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene LA detalje u odnosu na omjer naprezanja, R</i>	74
Slika 3.9. <i>Proračunate vrijednosti $S_{c,95\%}$ za HFMI obrađene TA detalje u odnosu na omjer naprezanja, R</i>	74
Slika 4.1. <i>Rast dubine pukotine, a u odnosu na broj promjena ciklusa opterećenja, N</i>	76
Slika 4.2. <i>Maksimalno lokalno naprezanje na rubu zavara</i>	77
Slika 4.3. <i>Faktori koncentracije naprezanja u elastičnom i plastičnom stanju</i>	78
Slika 4.4. <i>Neuberovo pravilo [130]</i>	78

Slika 4.5. <i>Histerezna petlja [129]</i>	80
Slika 4.6. <i>Dijagram tijeka TSM modela</i>	84
Slika 4.7. <i>Rezultati proračuna TSM modela za AW stanje – usporedba s ispitivanjima iz literature</i>	88
Slika 4.8. <i>Rezultati proračuna TSM modela za HFMI stanje – usporedba s ispitivanjima iz literature</i>	89
Slika 4.9. <i>Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S355 (AW i HFMI stanje)</i>	90
Slika 4.10. <i>Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S690 (AW i HFMI stanje)</i>	91
Slika 4.11. <i>Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S690 (AW i HFMI stanje)</i>	91
Slika 4.12. <i>Rezultati proračuna životnoga vijeka kod umora za S355, S690 i S960, LB)</i>	92
Slika 5.1. <i>Rezanje čelične ploče S690QL nominalne debljine 8 mm</i>	95
Slika 5.2. <i>Zavarivanje uzdužnog ukrućenja na ploču (LA detalj)</i>	95
Slika 5.3. <i>Zavarena uzdužna i poprečna ukrućenja na izrezane ploče S690QL</i>	96
Slika 5.4. <i>Geometrija ispitnih uzoraka, LA detalj (lijevo) i TA detalj (desno)</i>	97
Slika 5.5. <i>Prikaz glodanja uzoraka – izrada uzoraka za laboratorijsko ispitivanje</i>	98
Slika 5.6. <i>Izrađeni laboratorijski uzorci, LA detalj (lijevo) i TA detalj (desno)</i>	98
Slika 5.7. <i>AW (lijevo) i HFMI obrađeni (desno) TA detalj (S355J2+N)</i>	99
Slika 5.8. <i>HFMI mjerac dubine žlijeba (lijevo) i mjerenje dubine žlijeba (desno)</i>	99
Slika 5.9. <i>Mjerna postava (lijevo) i LA detalj na mjernoj postavi</i>	100
Slika 5.10. <i>Princip projekcijskog senzora "Atos" [63]</i>	101
Slika 5.11. <i>Primjer dobivenih modela uzoraka 3D skeniranjem</i>	101
Slika 5.12. <i>Geometrijski parametri mjereni na skeniranim modelima HFMI obrađenih uzoraka</i>	102
Slika 5.13. <i>Prikaz uzdužnih i poprečnih presjeka u alatu GOM Inspect Suite</i>	102
Slika 5.14. <i>Primjer mjerenja geometrijskih parametara u GOM Inspect-u</i>	103
Slika 5.15. <i>Veličine izmjerenih geometrijskih parametara u odnosu na broj mjerenja</i>	103
Slika 5.16. <i>Vlačno ispitivanje mehaničkih karakteristika osnovnog materijala</i>	105
Slika 5.17. <i>Nacrt epruvete za vlačno ispitivanje materijala</i>	105
Slika 5.18. <i>Radni dijagrami ispitnih uzoraka S355J2+N</i>	106
Slika 5.19. <i>Radni dijagrami ispitnih uzoraka S690QL</i>	107
Slika 5.20. <i>Uređaj za mjerenje tvrdoće (lijevo) i mjerenje tvrdoće na uzorcima (desno)</i>	108
Slika 5.21. <i>Mjerna mjesta tvrdoće na uzorcima</i>	108
Slika 5.22. <i>Uzorci za mjerenja zaostalnih naprezanja</i>	110
Slika 5.23. <i>Mjerni instrument (lijevo) i položaj mjernih točaka na detaljima (desno)</i>	111

Slika 5.24. Mjerenje zaostalih naprezanja na rubu zavara HFMI obrađenog LA detalja	111
Slika 5.25. Mjerenje zaostalih naprezanja na rubu zavara HFMI obrađenog TA detalja	112
Slika 5.26. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S355J2+N)	113
Slika 5.27. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S690QL)	113
Slika 5.28. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih TA detalja (S355J2+N)	115
Slika 5.29. Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod zavarenih LA detalja (S690QL)	115
Slika 5.30. Mjerna postava za cikličko ispitivanje uzoraka	116
Slika 5.31. Fotografiranje rubova zavara i očitavanje broja ciklusa (lijevo) i otkazivanje uzorka na rubu zavara (desno)	118
Slika 5.32. Rezultati ispitivanja uzoraka od S355J2+N prikazani dijagramom $\Delta\sigma$ -N.....	119
Slika 5.33. Uzorci koji su očekivano otkazali na rubu zavara	120
Slika 5.34. Uzorci S355-LA-HFMI-02 i S355-TA-HFMI-01 koji nisu otkazali („run out“) .	121
Slika 5.35. Uzorak S355-TA-HFMI-04 koji je otkazao u osnovnom materijalu (dolje)	121
Slika 5.36. Primjeri pukotina prije samog otkazivanja na rubu vara zavarenih detalja izloženih umoru	122
Slika 5.37. Ploha loma uzorka S355-TA-HFMI-04.....	122
Slika 5.38. Plohe loma uzorka S355-LA-AW-01 (lijevo) i S355-LA-AW-03 (desno).....	123
Slika 5.39. Plohe loma uzorka S355-LA-HFMI-01 (lijevo) i S355-LA-HFMI-03 (desno) ..	123
Slika 5.40. Plohe loma uzorka S355-TA-AW-01 (gore) i S355-TA-AW-03 (dolje).....	123
Slika 5.41. Plohe loma uzorka S355-TA-HFMI-02 (gore) i S355-TA-HFMI-03 (dolje)	124
Slika 5.42. Cikličko ispitivanje uzorka S690-LA-HFMI-02 (lijevo) i S690-TA-AW-01 (desno)	125
Slika 5.43. Rezultati ispitivanja uzorka od S690QL prikazani dijagramom $\Delta\sigma$ -N.....	126
Slika 5.44. Uzorak S690-LA-HFMI-03 koji je otkazao na rubu zavara	127
Slika 5.45. Uzorak S690-LA-HFMI-04 koji je otkazao u osnovnom materijalu	127
Slika 5.46. Plohe loma uzorka S690-LA-AW-01 (lijevo) i S690-LA-HFMI-03 (desno).....	128
Slika 5.47. Plohe loma uzorka S690-TA-HFMI-01 (gore) i S690-TA-HFMI-03 (dolje)	128
Slika 5.48. Faze pomaka čeljusti.....	129
Slika 5.49. Primjer procjene perioda nastanka i širenja pukotine (S355-LA-AW-03)	130
Slika 5.50. Pukotina na rubu zavara detalja S355-LA-AW-03	132

Slika 5.51. <i>Pukotina na rubu zavara detalja S355-LA-HFMI-01</i>	133
Slika 5.52. <i>Nastala pukotina rubi zavara detalja S355-LA-HFMI-05</i>	134
Slika 5.53. <i>Nastala pukotina rubi zavara detalja S355-TA-AW-02</i>	135
Slika 5.54. <i>Pukotina na rubu zavara detalja S355-TA-AW-03</i>	136
Slika 5.55. <i>Pukotina nastala na rubu zavara detalja S355-TA-AW-04</i>	137
Slika 5.56. <i>Pukotina na rubu zavara detalja S355-TA-HFMI-02</i>	138
Slika 5.57. <i>Pukotina na rubu zavara detalja S355-TA-HFMI-03</i>	139
Slika 6.1. <i>Geometrija numeričkih modela: a) LA-AW, b) LA-HFMI, c) TA-AW, d) TA-HFMI</i>	145
Slika 6.2. <i>Prikaz mreže numeričkih modela: a) LA-AW, b) LA-HFMI, c) TA-AW, d) TA-HFMI</i>	145
Slika 6.3. <i>Raspodjela naprezanja u LA detalju: AW(lijevo), HFMI (desno)</i>	146
Slika 6.4. <i>Raspodjela naprezanja u TA detalju: AW (lijevo), HFMI (desno)</i>	146
Slika 6.5. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	149
Slika 6.6. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	149
Slika 6.7. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	150
Slika 6.8. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	151
Slika 6.9. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	153
Slika 6.10. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	154
Slika 6.11. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	155
Slika 6.12. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	155
Slika 7.1. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-LA-AW</i>	164
Slika 7.2. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-LA-HFMI</i>	164
Slika 7.3. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-TA-AW</i>	164
Slika 7.4. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj S355-TA-HFMI</i>	165
Slika 7.5. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj LA-S690-AW</i>	165
Slika 7.6. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj LA-690-HFMI</i>	165
Slika 7.7. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj TA-S690-AW</i>	166
Slika 7.8. <i>Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj TA-690-HFMI</i>	166
Slika 7.9. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	169
Slika 7.10. <i>Rezultati proračuna TSM modela i rezultati cikličkih ispitivanja detalja</i>	170
Slika 7.11. <i>Rezultati proračuna stohastičkoga TSM modela za detalj S690-LA-HFMI</i> <i>(nadopuna s rezultatima iz literature)</i>	171

Slika 7.12. Rezultati proračuna stohastičkoga TSM modela za detalj S690-TA-HFMI (nadopuna s rezultatima iz literature).....	171
Slika 7.13. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 09_S355-LA-AW – Ktmin	173
Slika 7.14. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 10_S355-LA-AW – Ktmax	173
Slika 7.15. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 11_S355-LA-HFMI – Ktmin.....	173
Slika 7.16. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 12_S355-LA-HFMI – Ktmax.....	174
Slika 7.17. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 13_S355-TA-AW – Ktmin	174
Slika 7.18. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 14_S355-TA-AW – Ktmax	174
Slika 7.19. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 15_S355-TA-HFMI – Ktmin.....	175
Slika 7.20. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 16_S355-TA-HFMI – Ktmax.....	175
Slika 7.21. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 17_S690-LA-AW – Ktmin	175
Slika 7.22. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 18_S690-LA-AW – Ktmax	176
Slika 7.23. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 19_S690-LA-HFMI – Ktmin.....	176
Slika 7.24. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 20_S690-LA-HFMI – Ktmax.....	176
Slika 7.25. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 21_S690-TA-AW – Ktmin	177
Slika 7.26. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 22_S690-TA-AW – Ktmax	177
Slika 7.27. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 23_S690-TA-HFMI – Ktmin.....	177
Slika 7.28. Rezultati Monte Carlo simulacije za detalj 24_S690-TA-HFMI – Ktmax.....	178

POPIS TABLICA

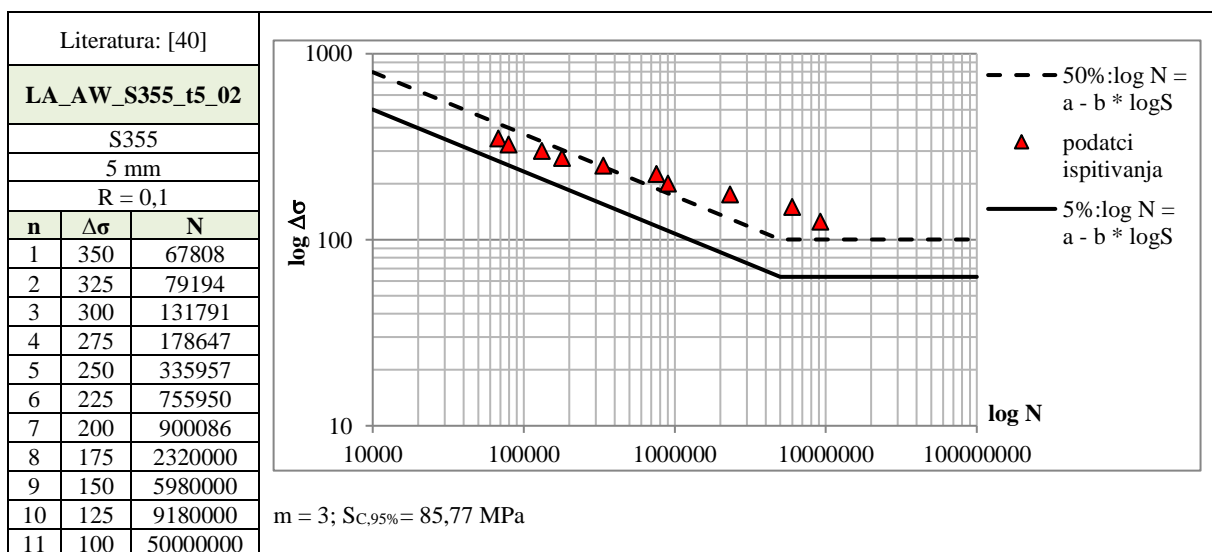
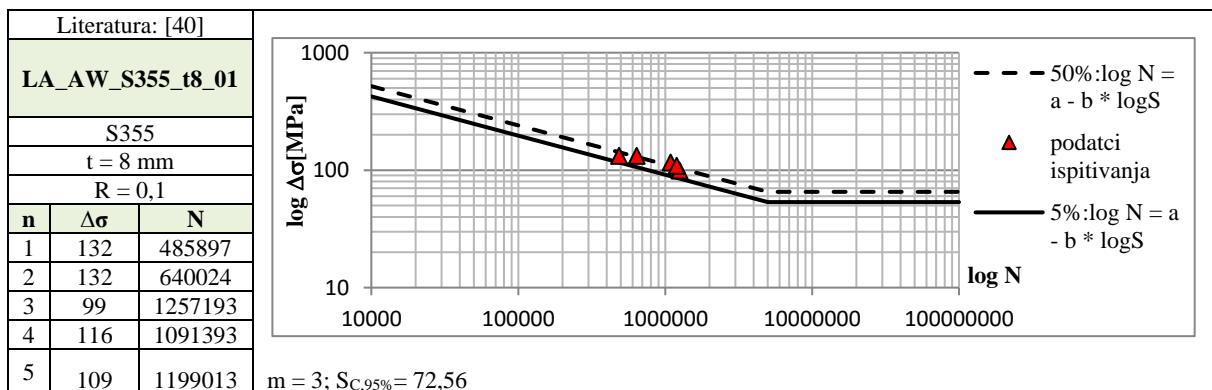
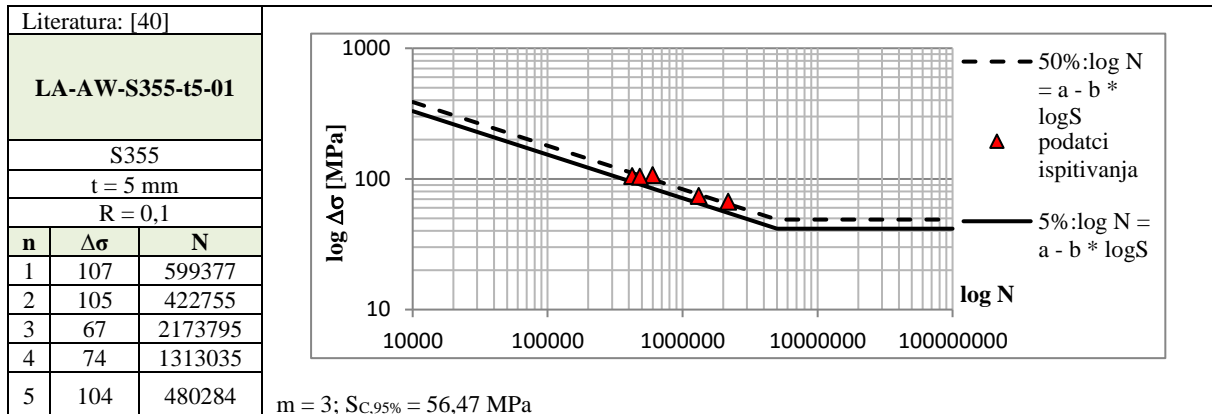
Tablica 1.1. <i>Prikaz uzroka oštećenja čeličnih konstrukcija prema tipovima konstrukcija</i>	2
Tablica 2.1. <i>Primjer osnovnih parametara HFMI tretmana za dva HFMI uređaja [15]</i>	30
Tablica 3.1. <i>Laboratorijska ispitivanja AW-LA detalja</i>	68
Tablica 3.2. <i>Laboratorijska ispitivanja HFMI obrađenih LA detalja</i>	69
Tablica 3.3. <i>Laboratorijska ispitivanja AW-TA detalja</i>	69
Tablica 3.4. <i>Laboratorijska ispitivanja HFMI obrađenih TA detalja</i>	70
Tablica 4.1. <i>Geometrijske veličine LA detalja za proračun $M_k(a)$ [126]</i>	82
Tablica 4.2. <i>Geometrijske veličine TA detalja za proračun $M_k(a)$ [126]</i>	83
Tablica 4.3. <i>Ciklički materijalni parametri za NS pristup</i>	86
Tablica 4.4. <i>Usvojeni parametri HFMI obrađenja za parametarsku analizu TSM modela</i>	90
Tablica 5.1. <i>Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika S355J2+N</i>	94
Tablica 5.2. <i>Kemijska struktura osnovnog materijala konstrukcijskog čelika S690QL</i>	94
Tablica 5.3. <i>Parametri zavarivanja uzdužnih i poprečnih ukrućenja (S355J2+N i S690QL)</i> .	96
Tablica 5.4. <i>Kemijski sastav žice za zavarivanje (VAC 60)</i>	96
Tablica 5.5. <i>Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka</i>	97
Tablica 5.6. <i>Srednje vrijednosti i standardne devijacije mjerenih geometrijskih parametara</i>	104
Tablica 5.7. <i>Dimenzije epruveta za vlačno ispitivanje</i>	106
Tablica 5.8. <i>Rezultati vlačnog ispitivanja čelika S355J2+N i S690QL</i>	106
Tablica 5.9. <i>Statistički parametri rezultata vlačnog ispitivanja uzoraka</i>	107
Tablica 5.10. <i>Rezultati mjerenja tvrdoće na rubu zavara LA i TA detalja</i>	109
Tablica 5.11. <i>Rezultati mjerenja tvrdoće zavara i osnovnog materijala</i>	109
Tablica 5.12. <i>Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod LA detalja</i>	112
Tablica 5.13. <i>Rezultati mjerenja posmičnih zaostalih naprezanja (τ_{xy}) kod LA detalja</i>	112
Tablica 5.14. <i>Rezultati mjerenja normalnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod TA detalja</i>	114
Tablica 5.15. <i>Rezultati mjerenja posmičnih zaostalih naprezanja (σ_x) kod TA detalja</i>	114
Tablica 5.16. <i>Matrica cikličkih ispitivanja laboratorijskih uzoraka</i>	117
Tablica 5.17. <i>Rezultati cikličkih ispitivanja uzoraka od S355J2+N</i>	119
Tablica 5.18. <i>Matrica cikličkih ispitivanja uzoraka izrađenih od čelika S690QL</i>	126
Tablica 5.19. <i>Rezultati cikličkih ispitivanja uzoraka izrađenih od čelika S690QL</i>	126
Tablica 5.20. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine prema pomacima čeljusti preše</i>	131
Tablica 5.21. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine prema analizi fotografija rubova zavara</i>	140

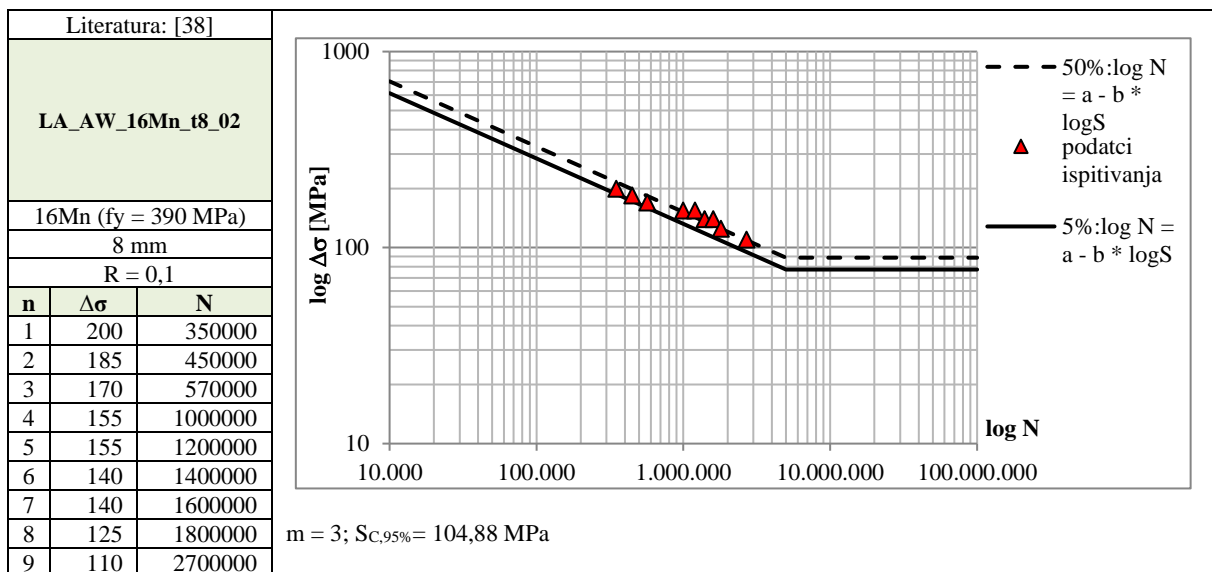
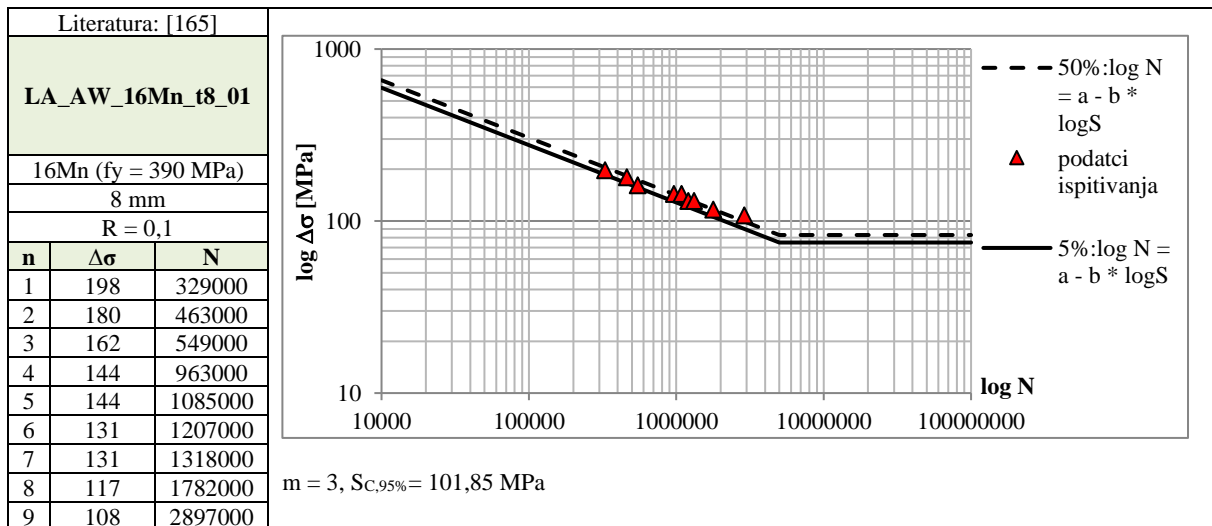
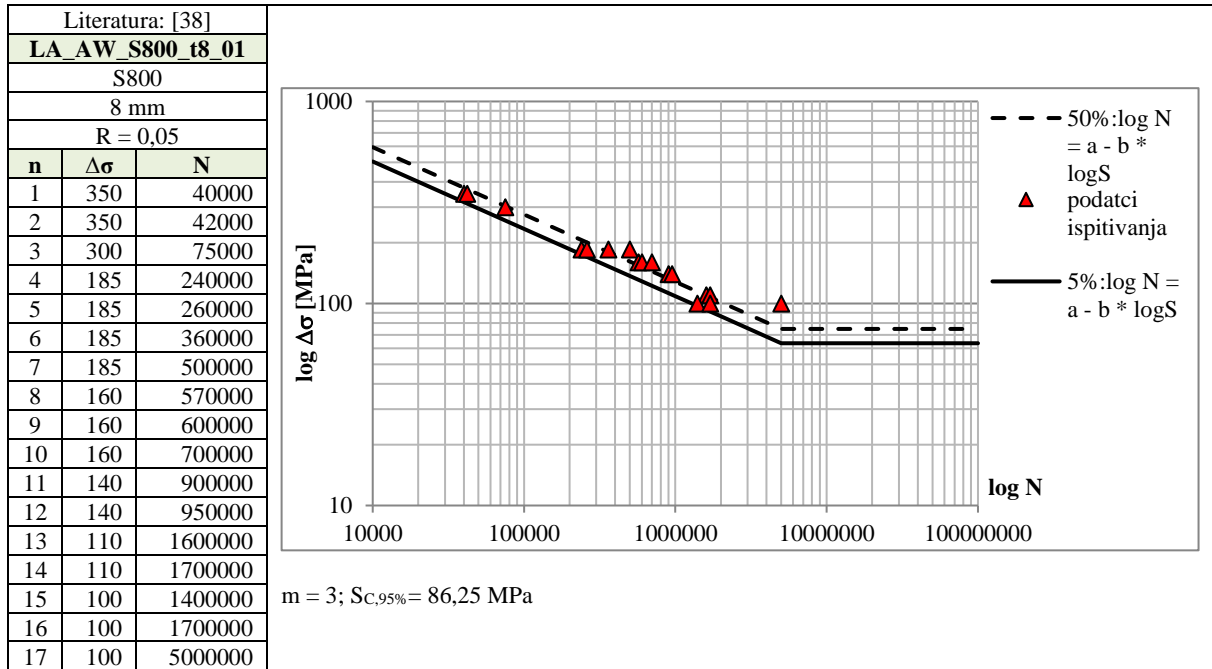
Tablica 5.22. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine prema analizi fotografija rubova zavara</i>	140
Tablica 5.23. <i>Udjeli perioda nastanka i širenja pukotine u ukupnom životnom vijeku detalja</i>	141
Tablica 6.1. <i>Usvojeni parametri za TSM model – detalji S355J2+N</i>	147
Tablica 6.2. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S355J2+N) – TSM model</i>	148
Tablica 6.3. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S355J2+N) – TSM model</i>	150
Tablica 6.4. <i>Usvojeni parametri za TSM model – detalji S690QL</i>	152
Tablica 6.5. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S690QL) – TSM model</i>	153
Tablica 6.6. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S690QL) – TSM model</i>	154
Tablica 6.7. <i>Rekapitulacija proračunatih otpornosti na umor pri $2 \cdot 10^6$ ciklusa ($S_{C,95\%}$)</i>	156
Tablica 7.1. <i>Pregled Monte Carlo simulacija</i>	160
Tablica 7.2. <i>Bazna varijabla opterećenja umorom, $\Delta\sigma$</i>	160
Tablica 7.3. <i>Bazne varijable mehaničkih karakteristika osnovnog materijala</i>	161
Tablica 7.4. <i>Bazne varijable cikličkih parametara detalja izrađenih od čelika S355J2+N</i>	161
Tablica 7.5. <i>Bazne varijable cikličkih parametara detalja izrađenih od čelika S690QL</i>	161
Tablica 7.6. <i>Bazne varijable Brinell-ove tvrdoće (HB)</i>	162
Tablica 7.7. <i>Bazne varijable zaostalih naprezanja</i>	162
Tablica 7.8. <i>Bazne varijable faktora koncentracije naprezanja K_t</i>	162
Tablica 7.9. <i>Bazne varijable geometrije</i>	163
Tablica 7.10. <i>Bazne varijable materijalnih parametara za proračun širenja pukotine</i>	163
Tablica 7.11. <i>Rezultati dobiveni determinističkim i stohastičkim TSM modelom (Slučaj I)</i>	166
Tablica 7.12. <i>Stupanj povećanja otpornosti na umor dobivene stohastičkim TSM modelom</i>	167
Tablica 7.13. <i>Ciklički parametri za kalibraciju TSM modela (S690 detalji s dodatnim cikličkim ispitivanjima iz literature)</i>	168
Tablica 7.14. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za LA detalje (S690QL) – TSM model</i>	169
Tablica 7.15. <i>Periodi nastanka i širenja pukotine za TA detalje (S690QL) – TSM model</i>	170
Tablica 7.16. <i>Bazne varijable faktora koncentracije naprezanja K_t</i>	172
Tablica 7.17. <i>Rezultati dobivenih statističkom analizom – Slučaj B</i>	178
Tablica 7.18. <i>Rasponi minimalnih i maksimalnih karakterističnih otpornosti na umor</i>	179

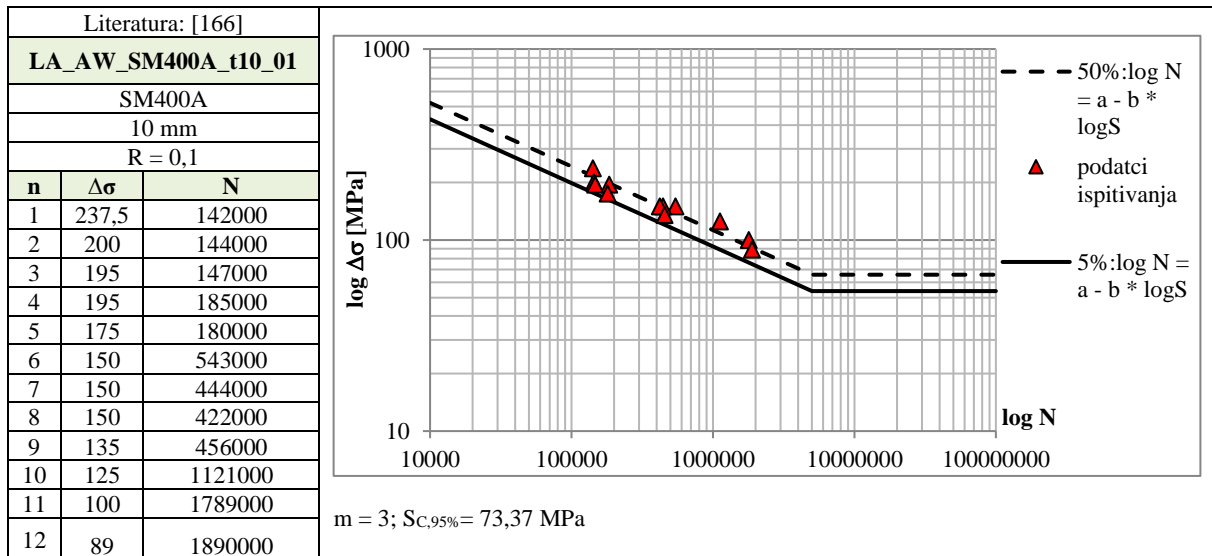
PRILOG A – CIKLIČKA ISPITIVANJA IZ LITERATURE

U nastavku su tablično prikazani prikupljeni podaci ispitivanja iz literature s osnovnim informacijama. Statističkom analizom je određena vrijednost $S_{C,95\%}$.

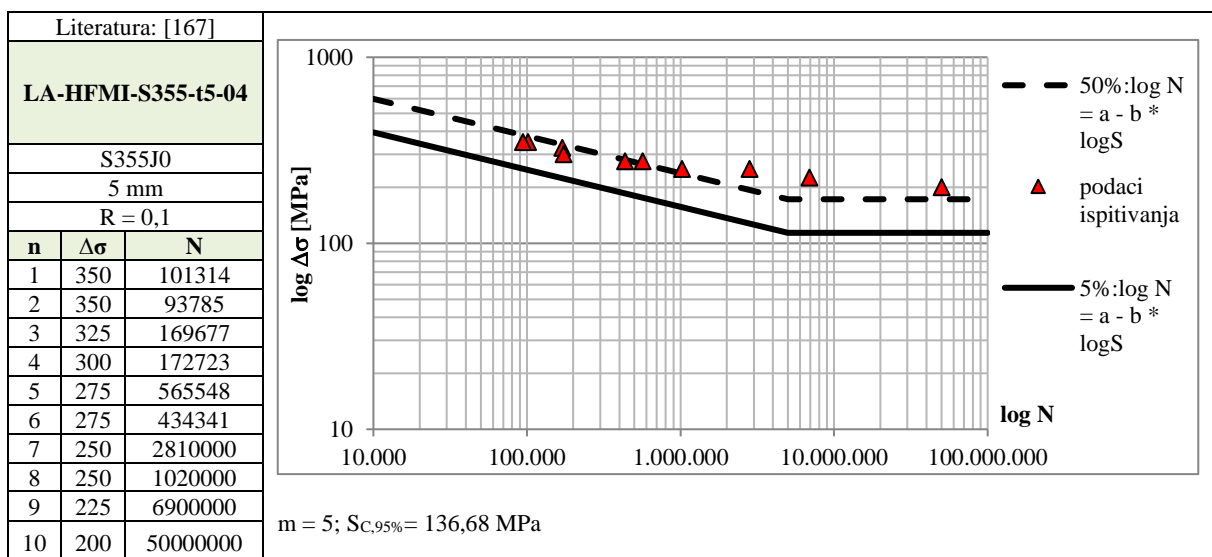
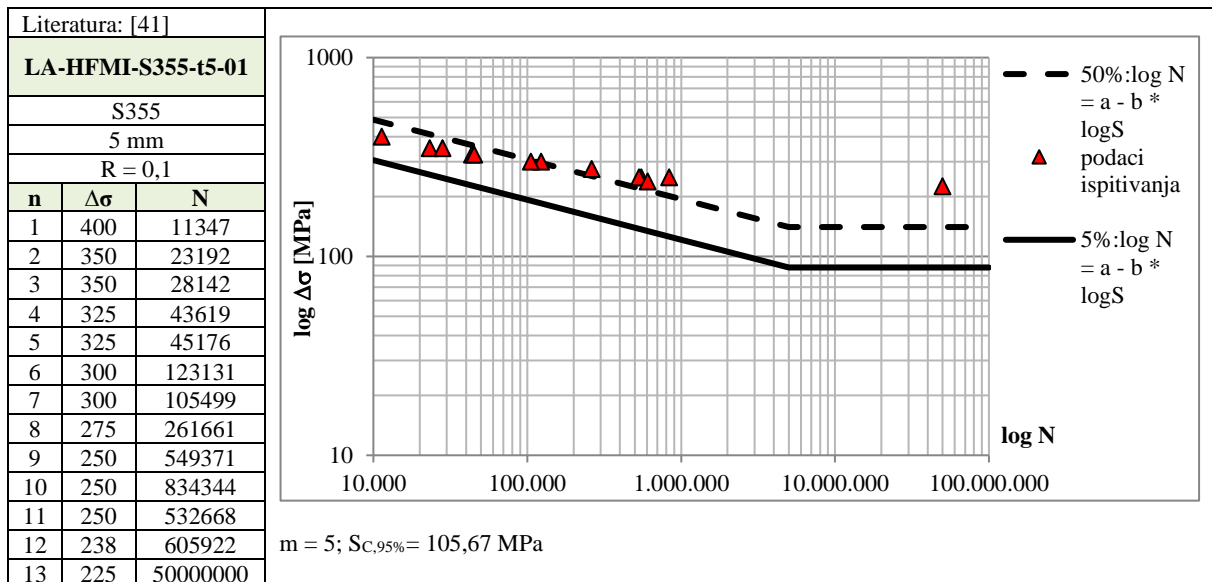
a) LA-AW detalji (m = 3)

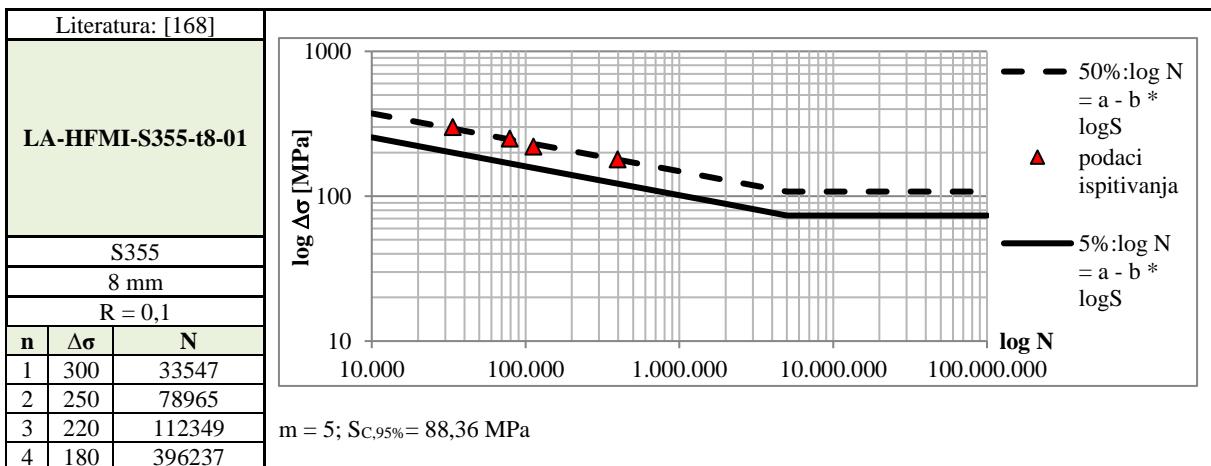
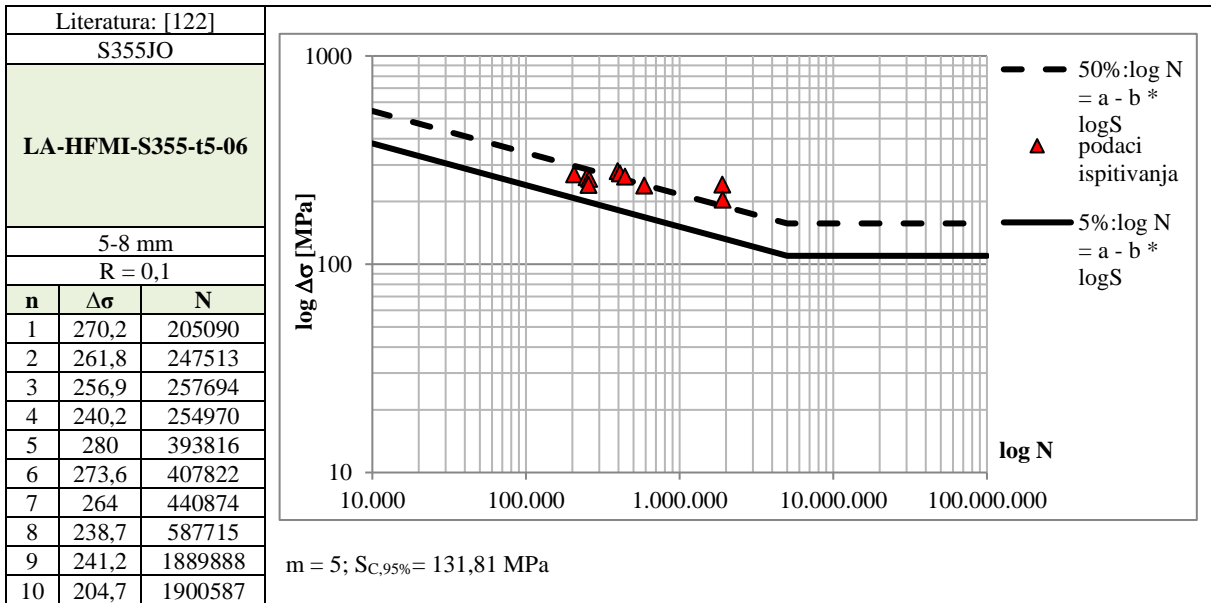
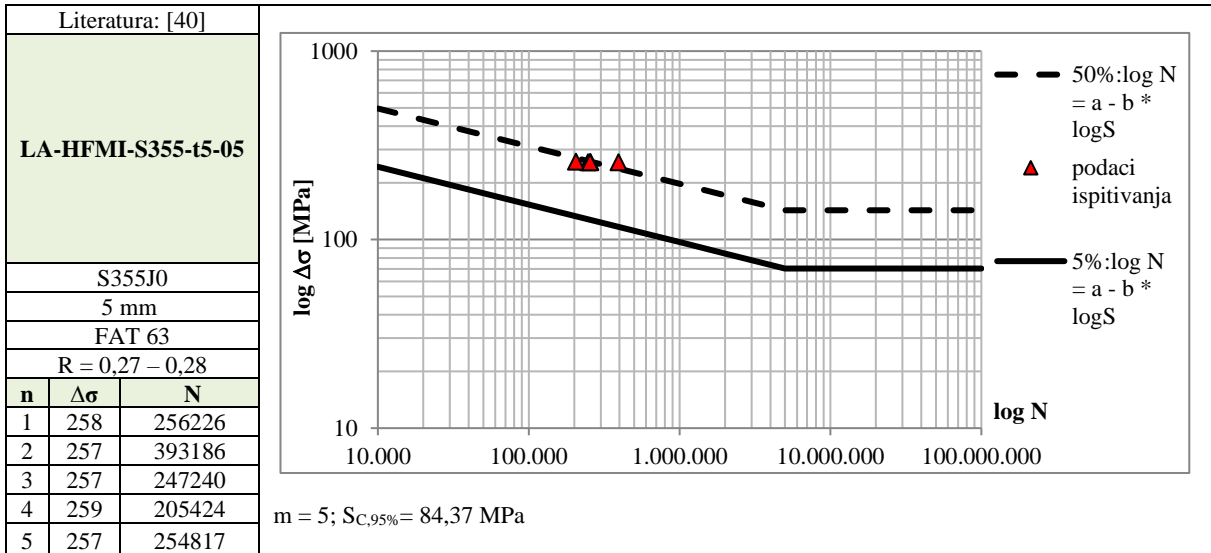


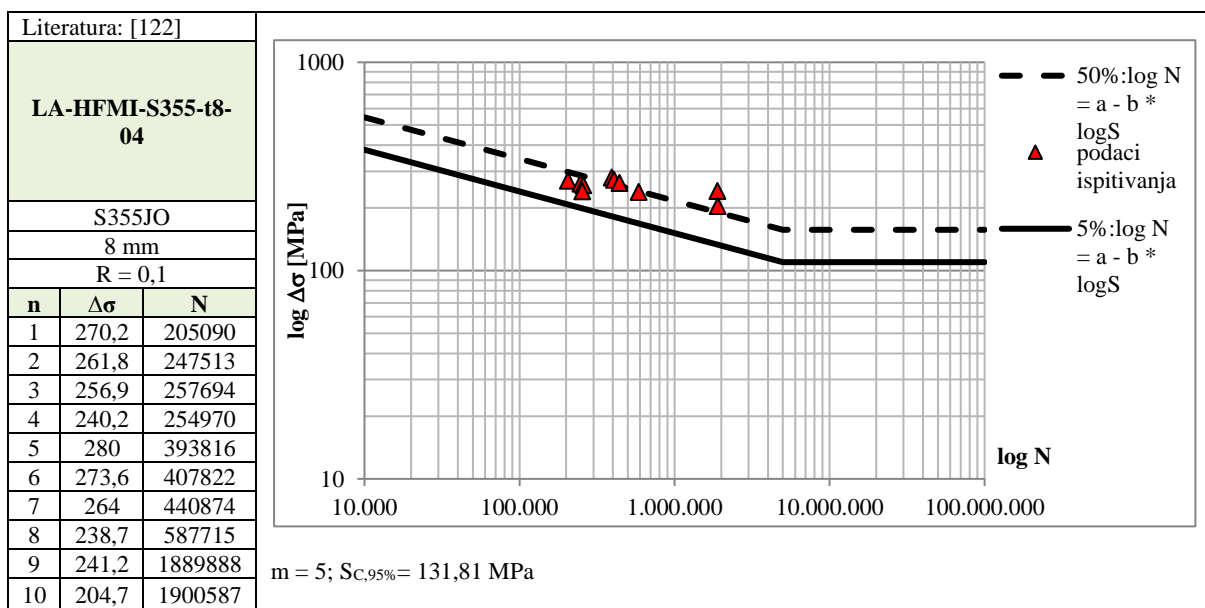
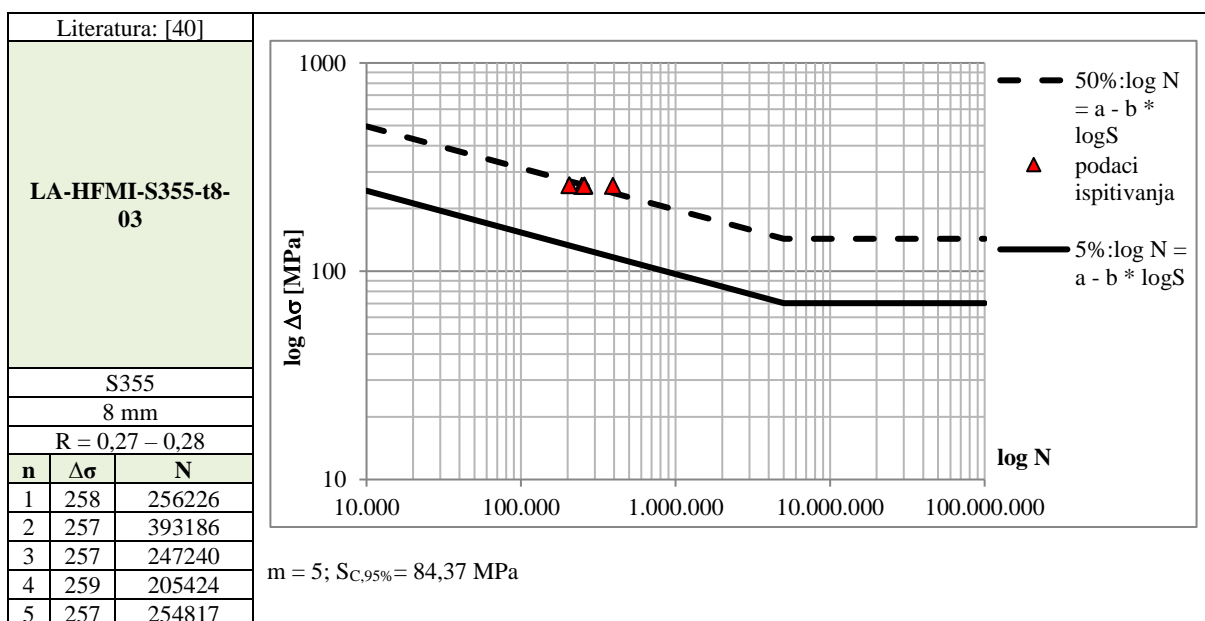
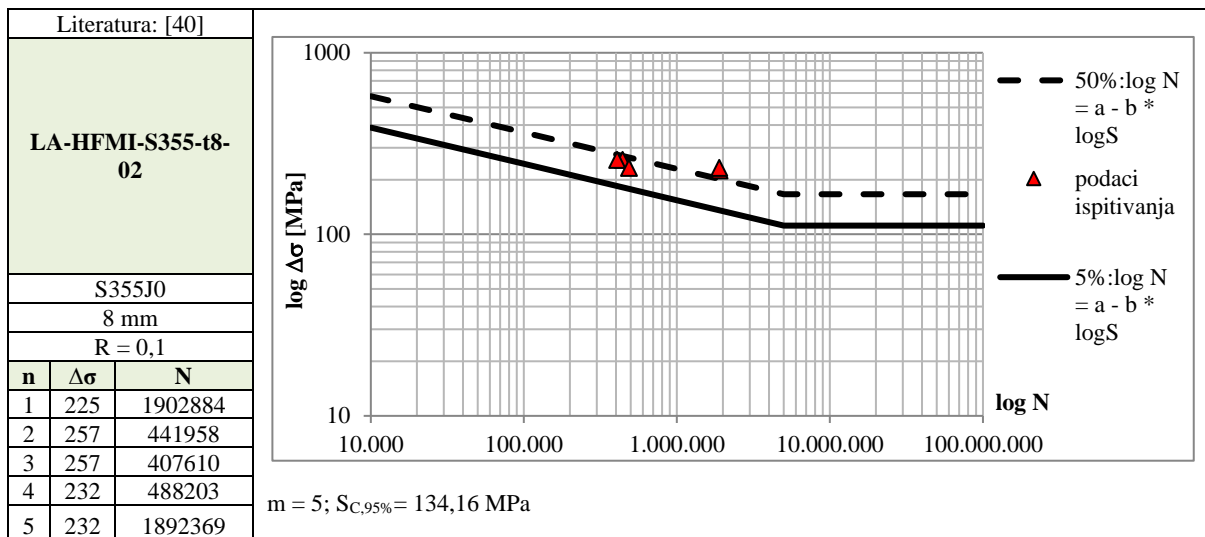


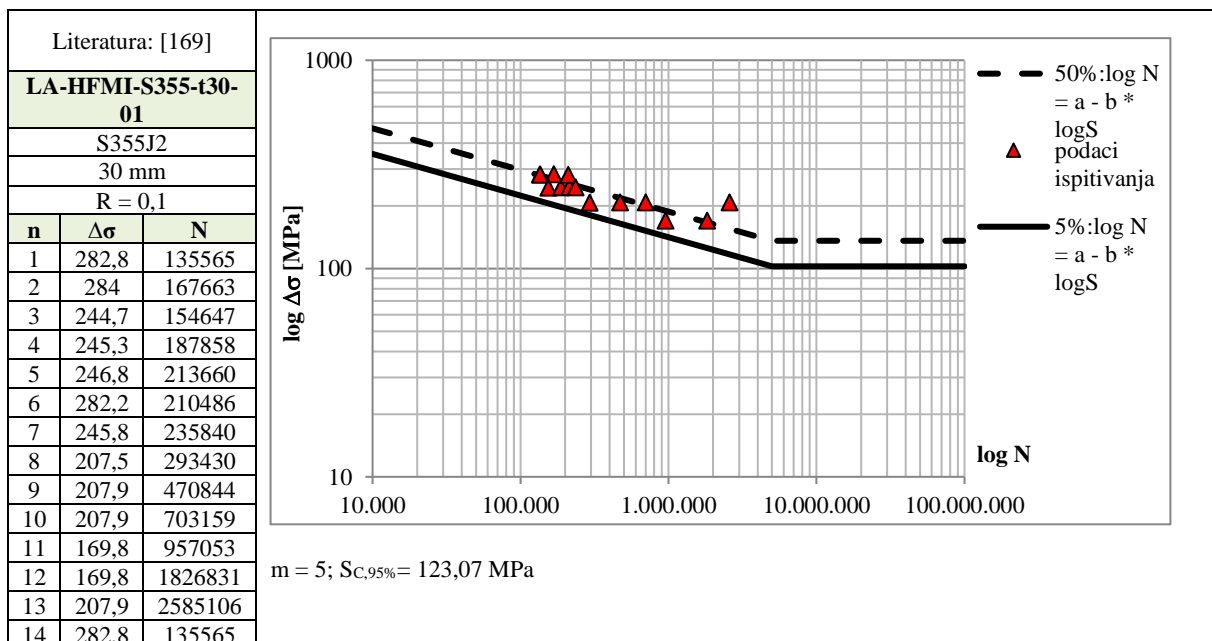
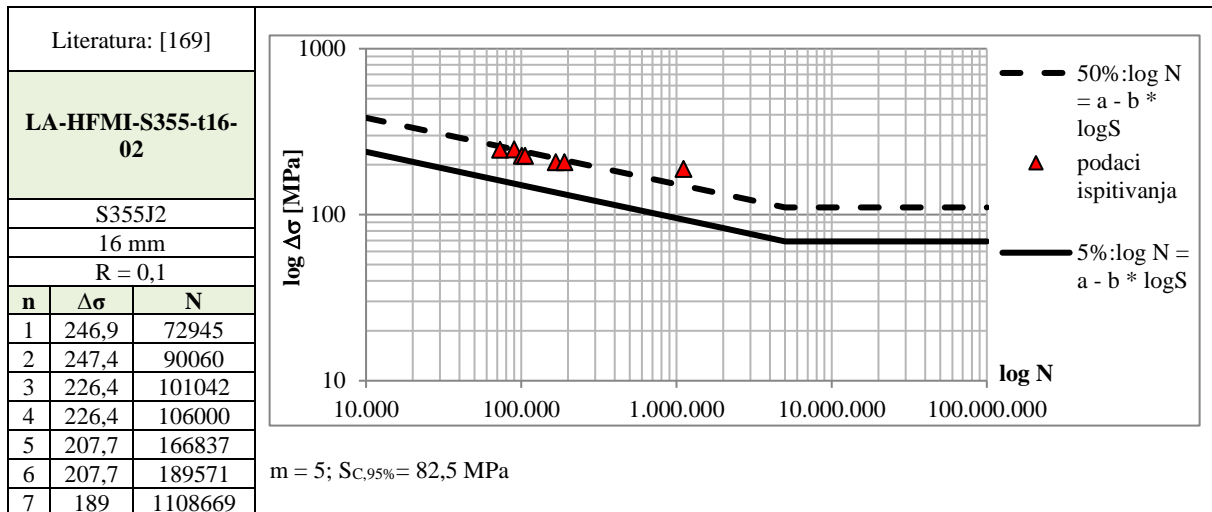
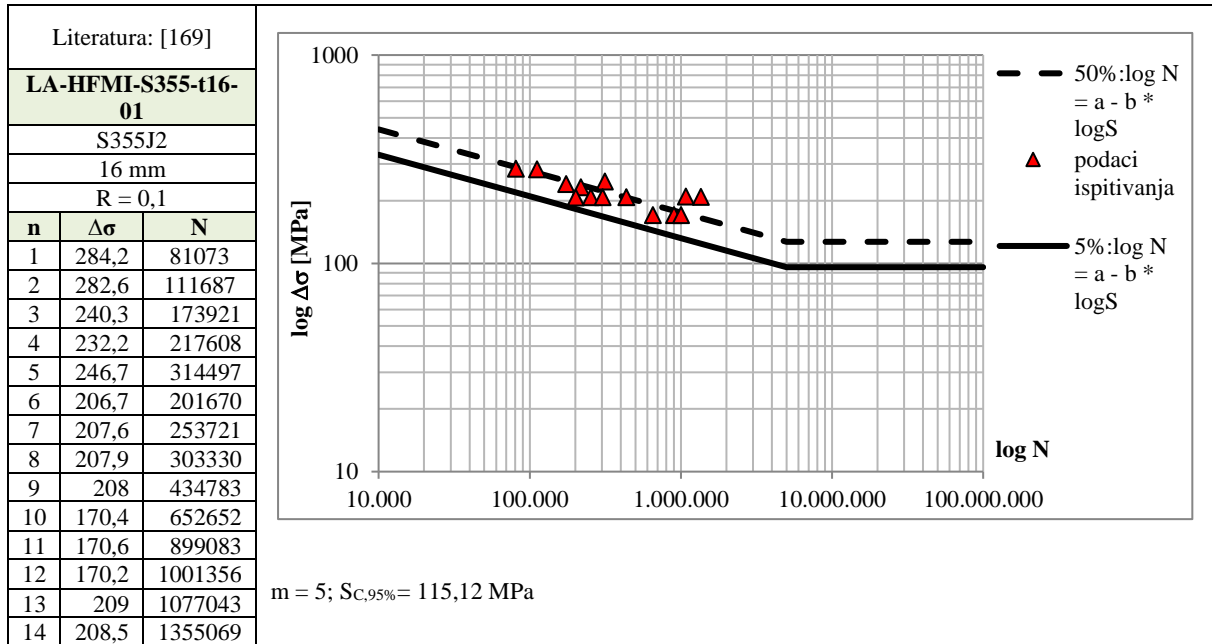


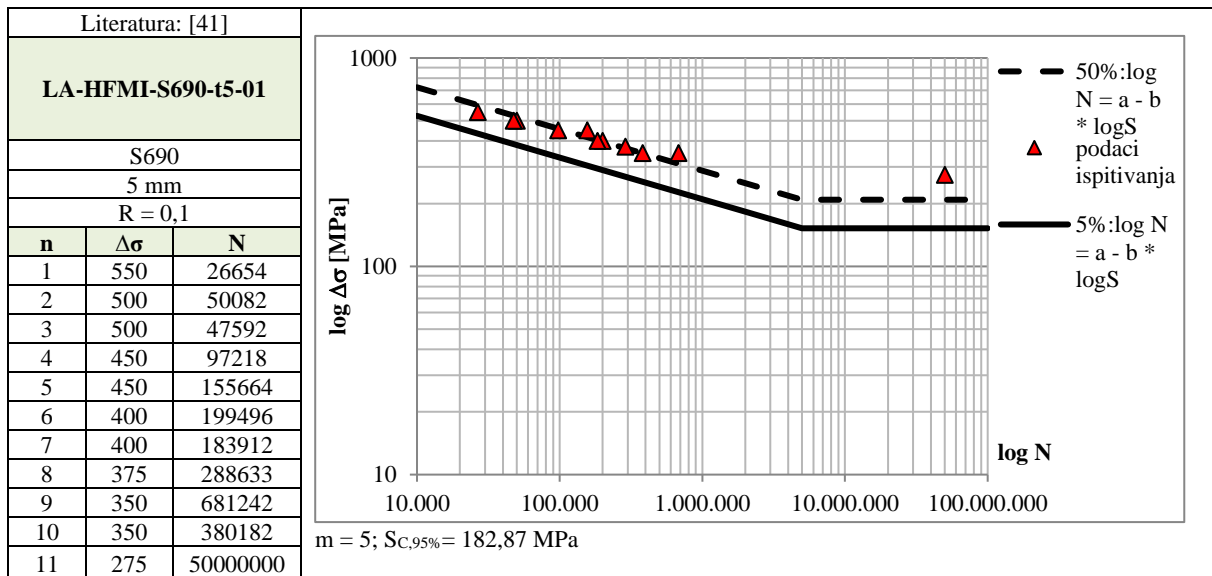
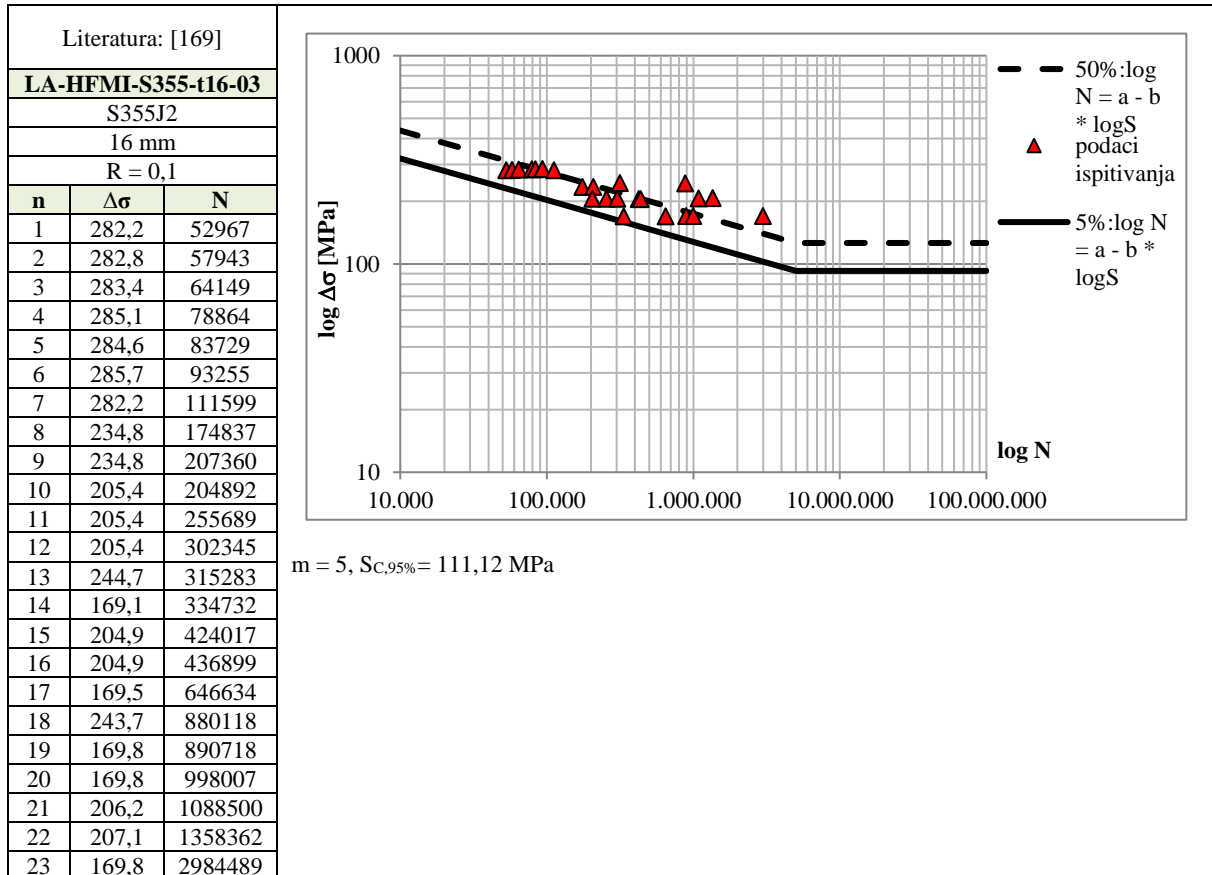
b) LA-HFMI detalji (m = 5)

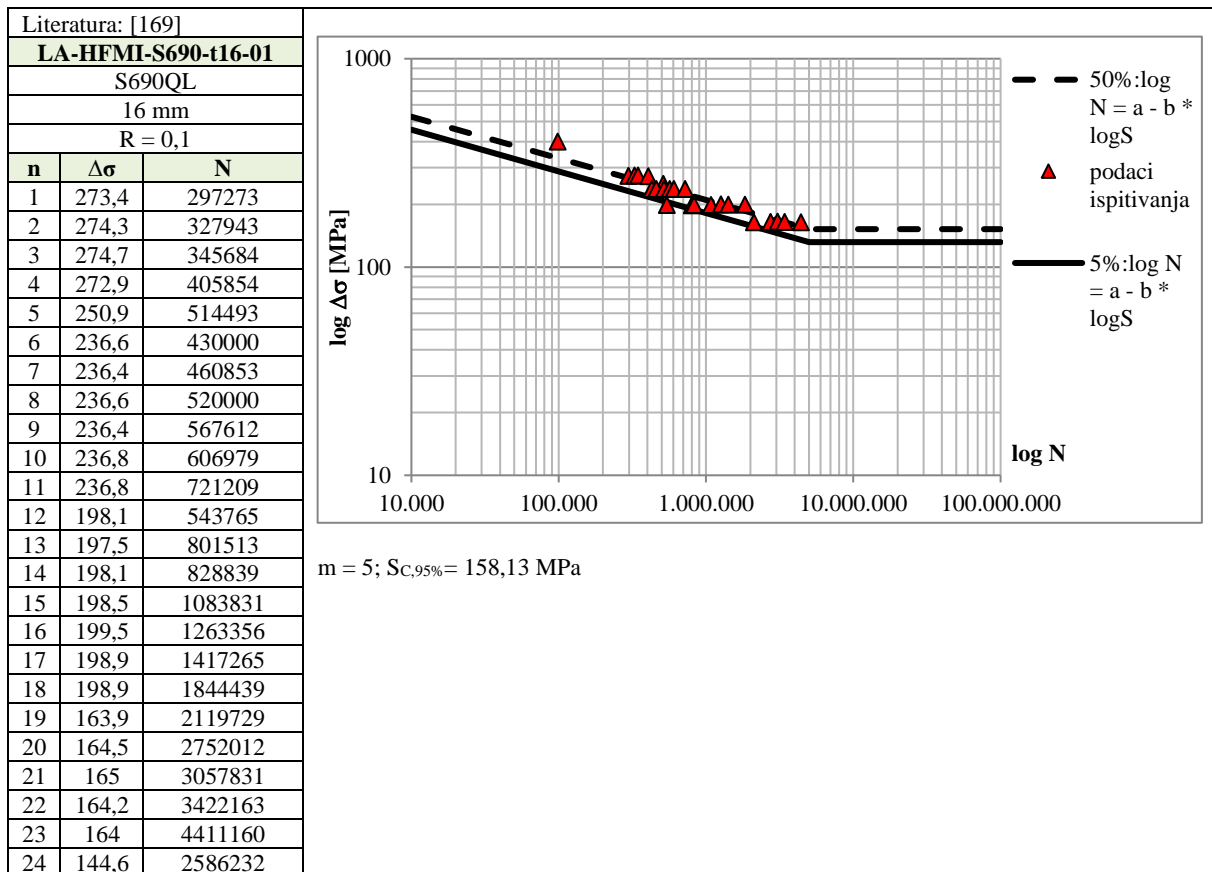
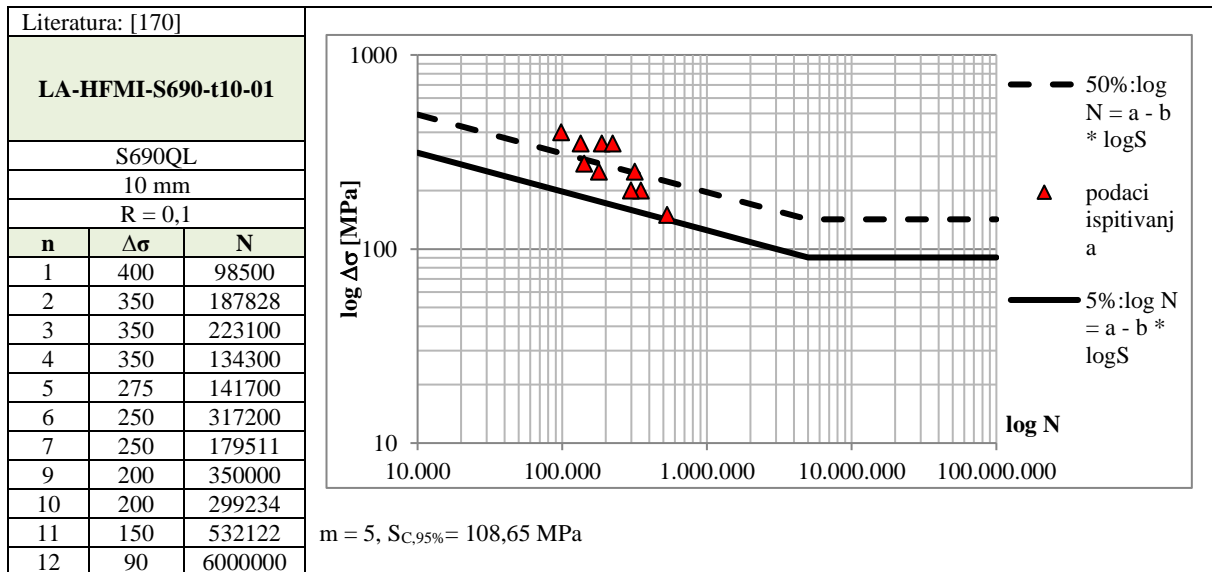


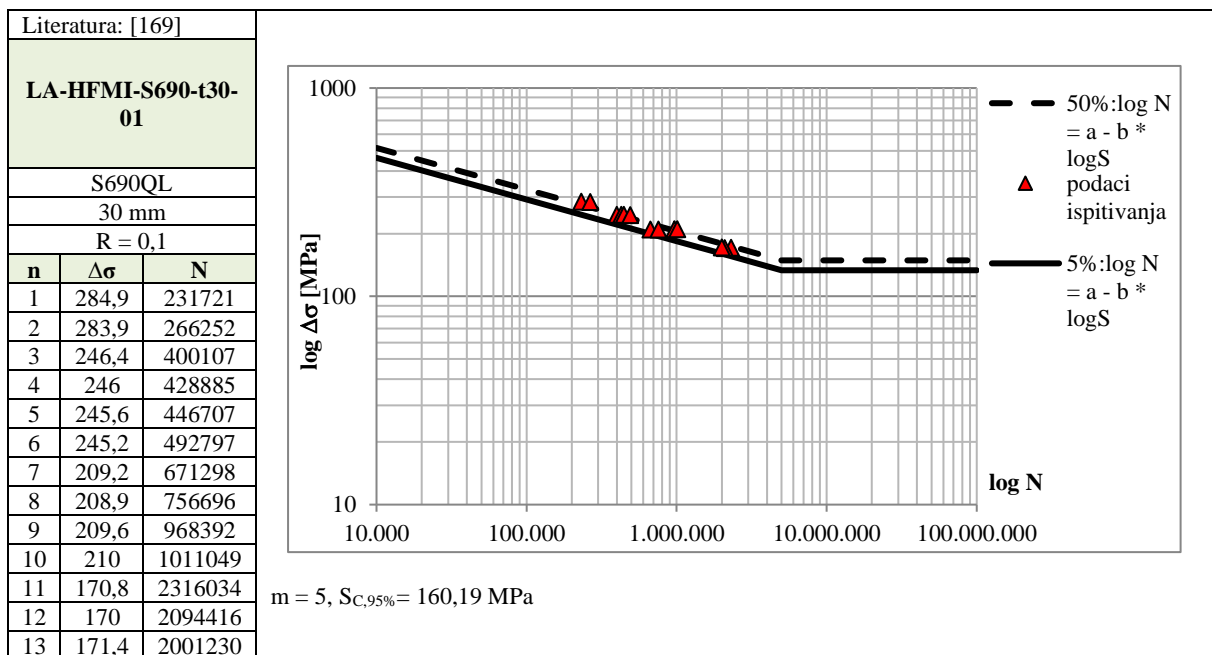
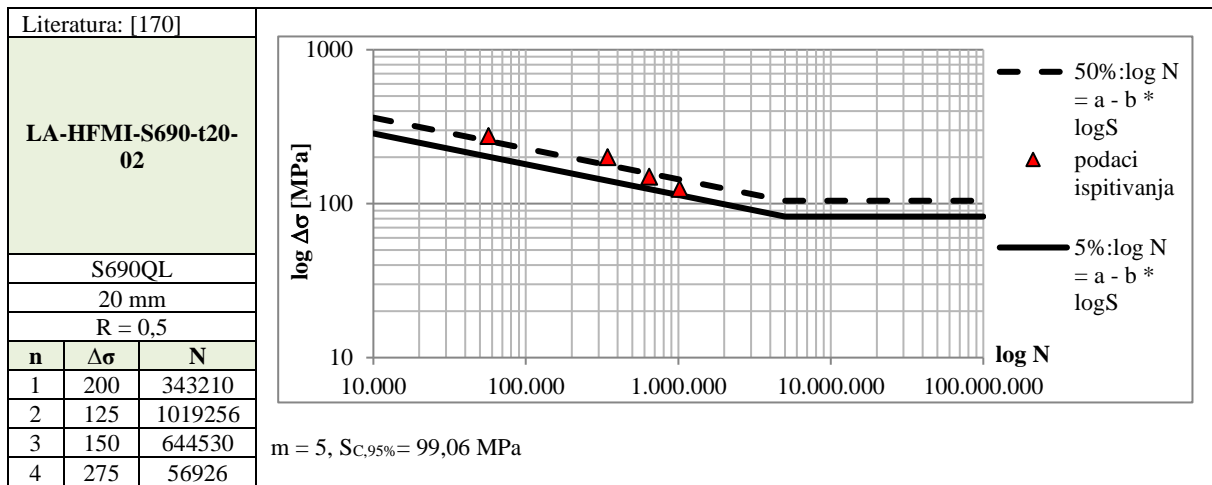
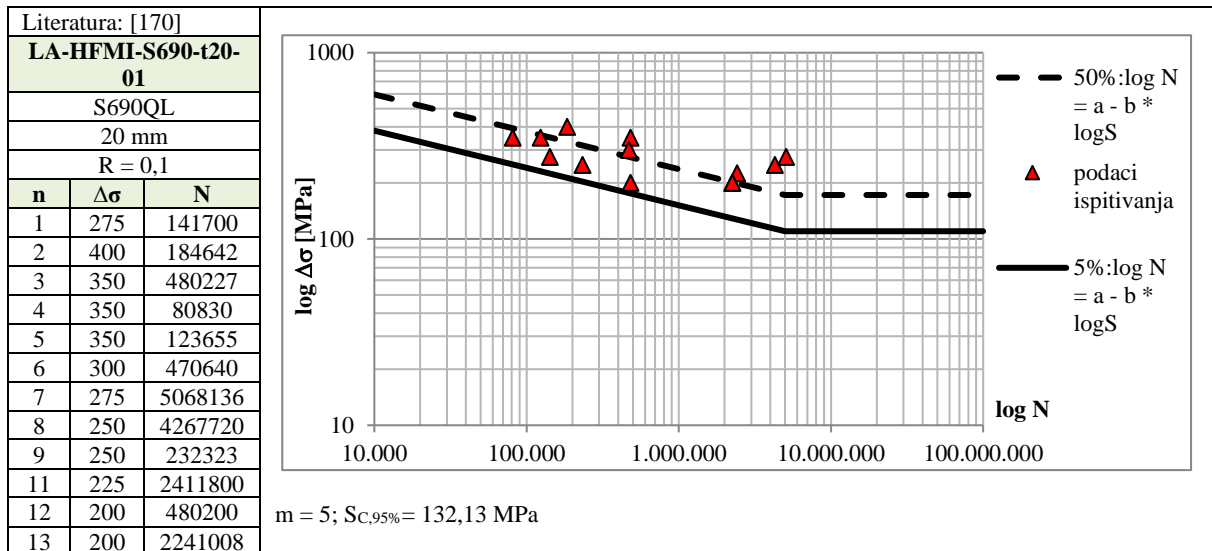


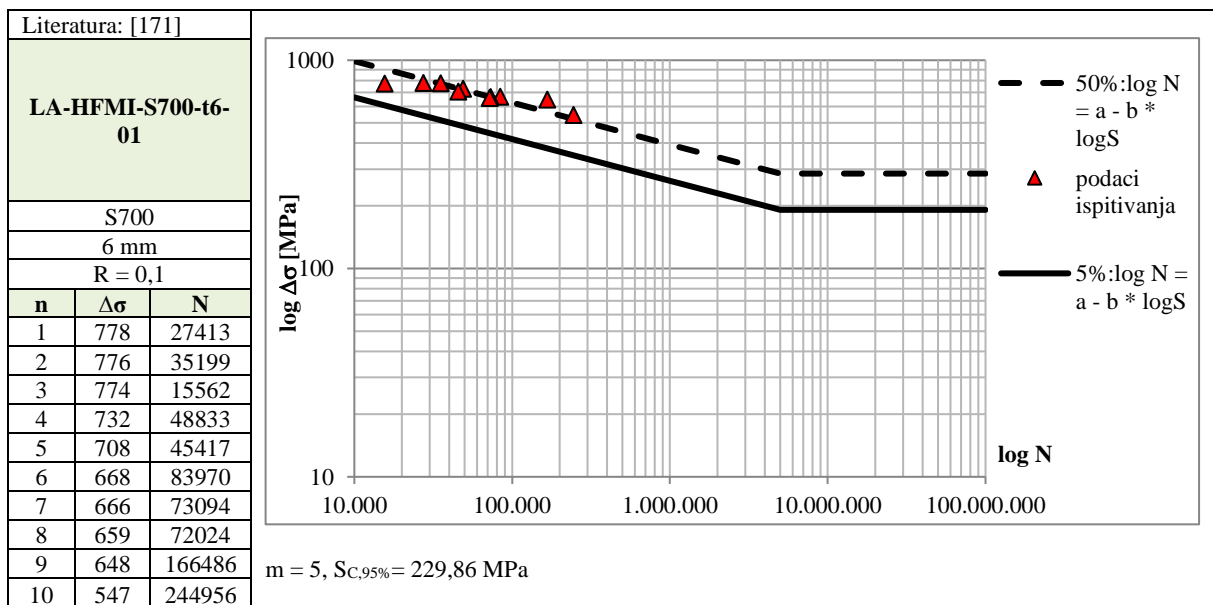
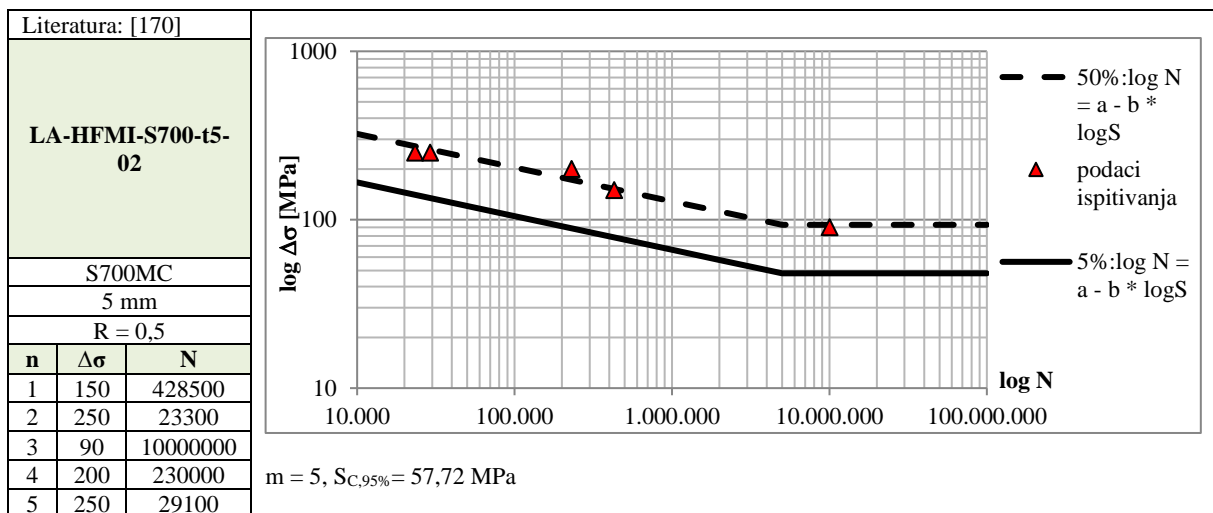
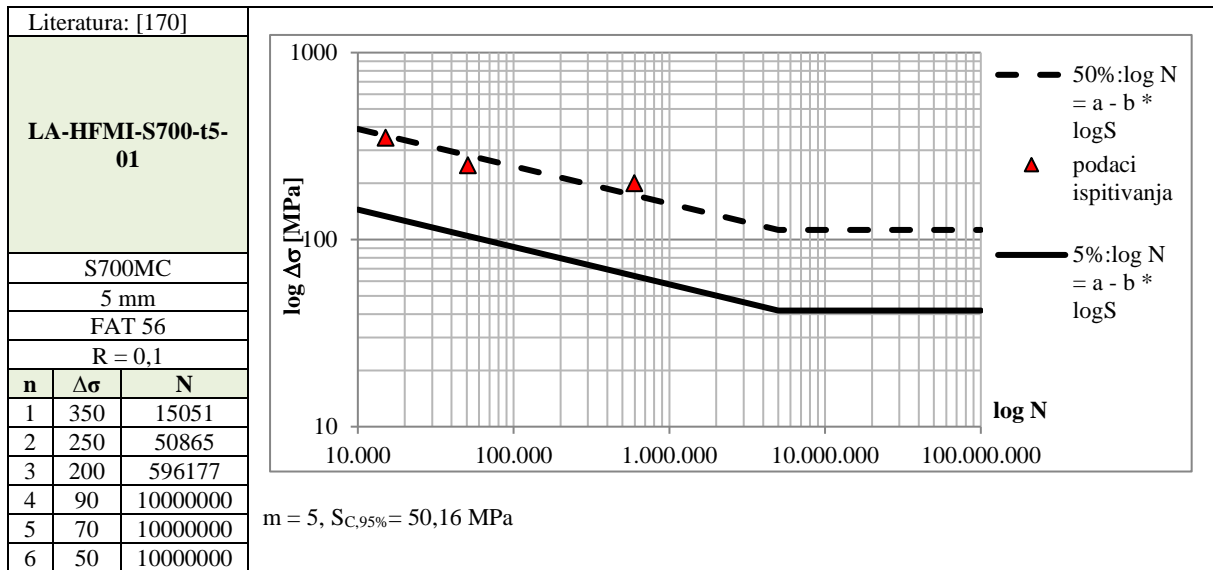


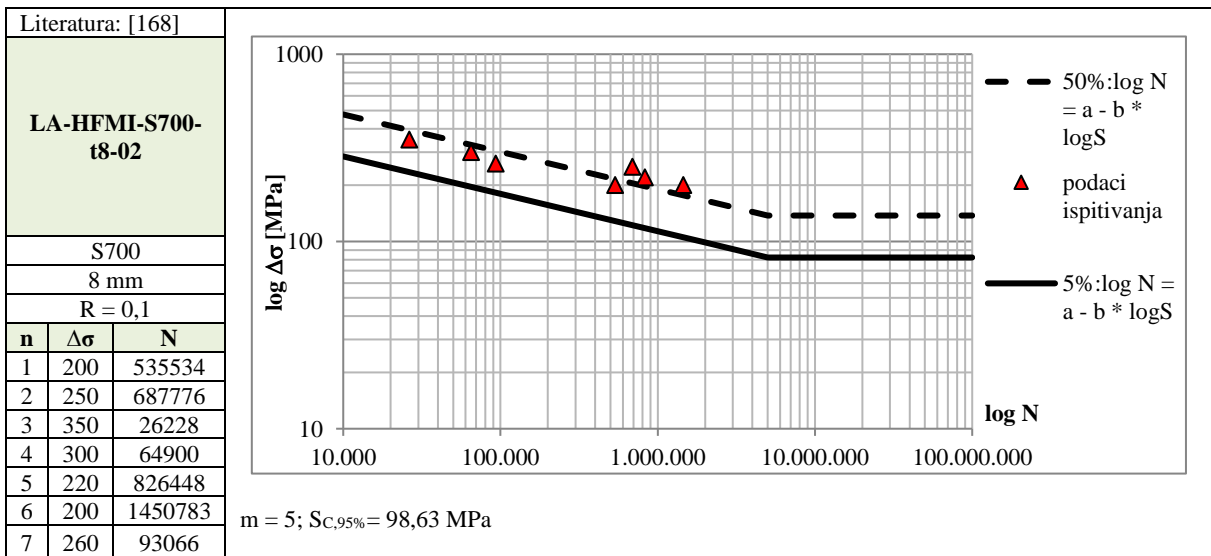
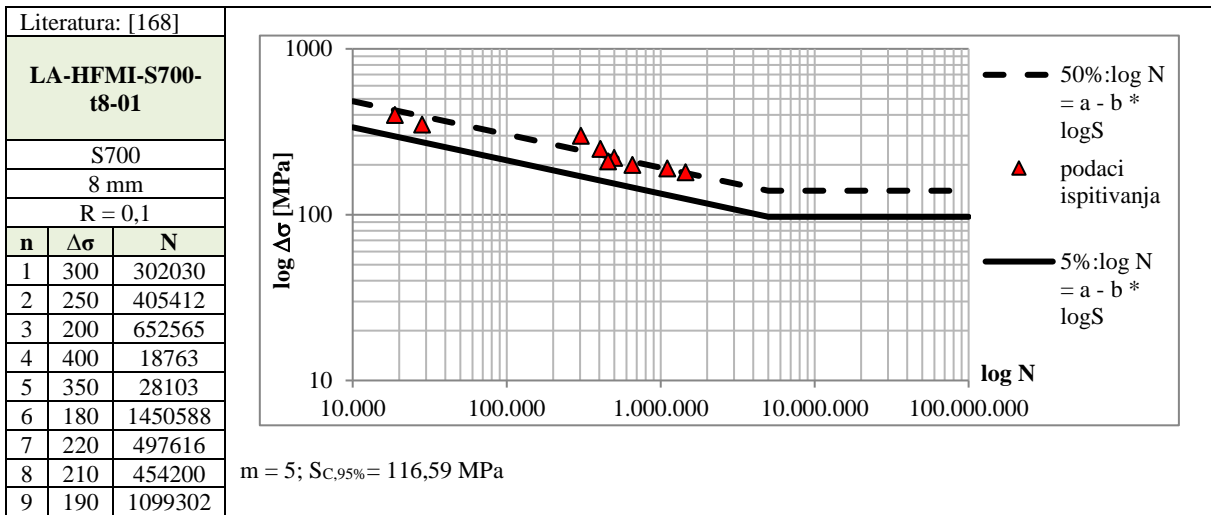
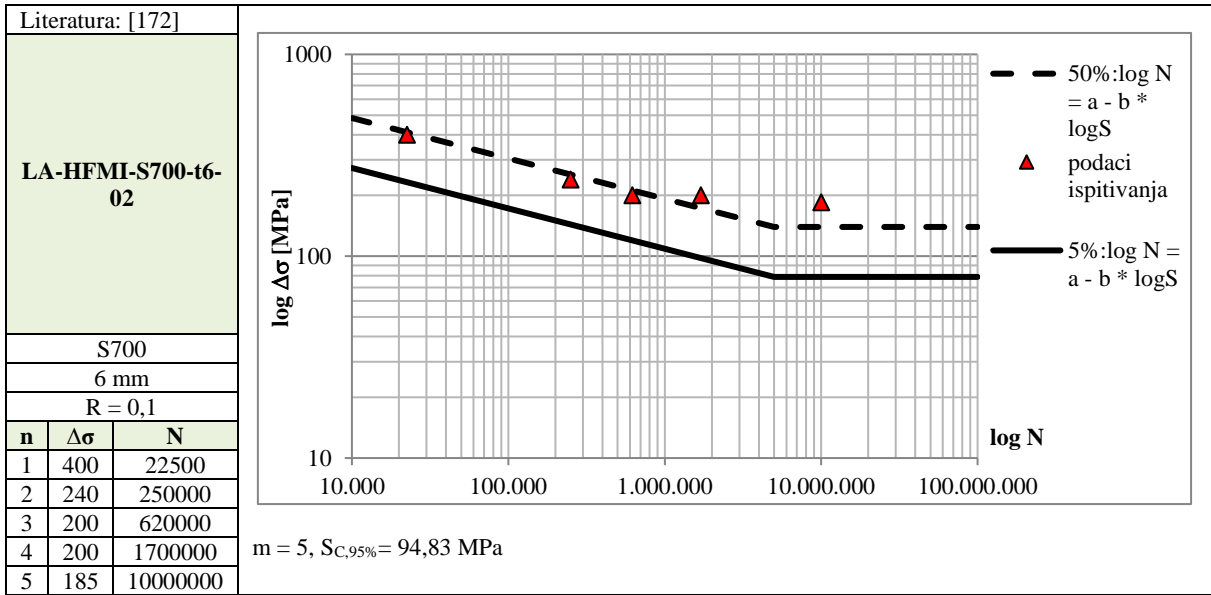




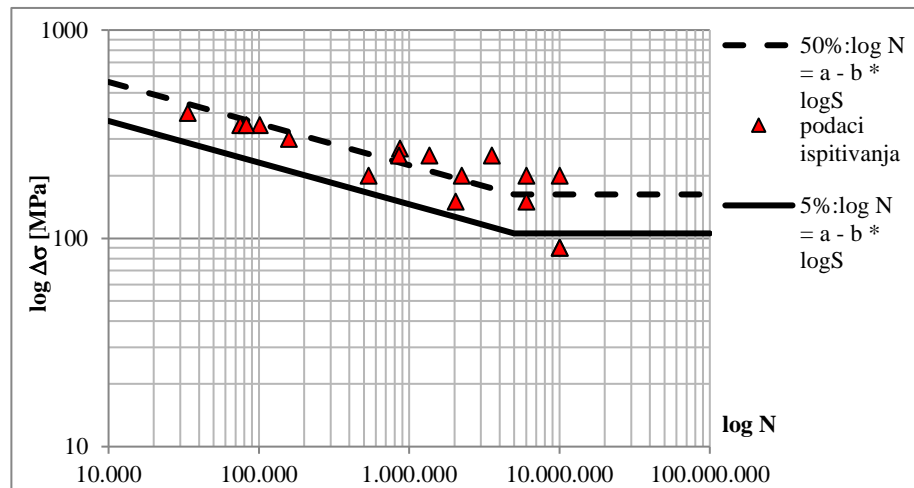






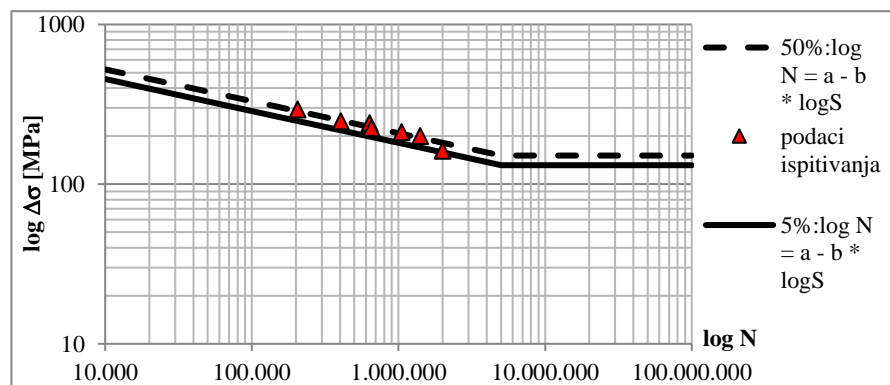


Literatura: [170]		
LA-HFMI-S700-t10-01		
S700MC		
10 mm		
R = 0,1		
n	$\Delta\sigma$	N
1	400	33600
2	270	868600
3	90	10000000
4	200	10000000
5	250	1361300
6	350	75100
7	300	158200
8	150	2031700
9	90	10000000
10	200	2235000
11	250	3547800
12	350	101200
13	250	855162
14	150	6000000
15	200	6000000
16	350	82506
17	225	18010



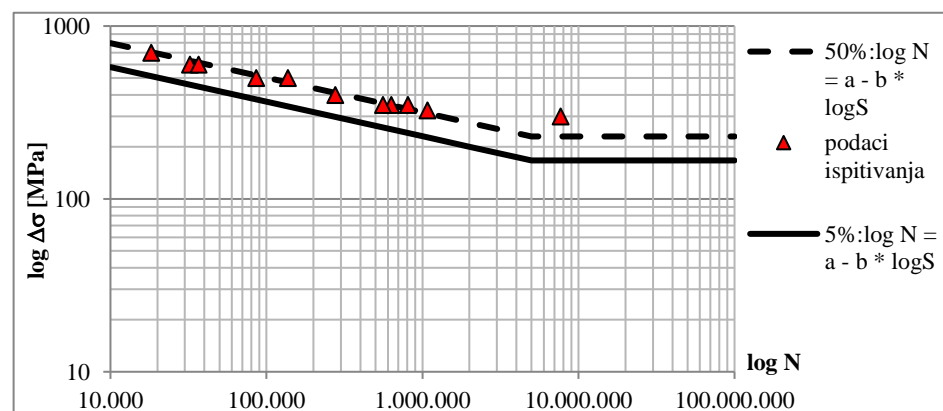
$m = 5$; $S_{C,95\%} = 126,84$ MPa

Literatura: [173]		
LA-HFMI-S700-t12-01		
S700		
12 mm		
R = 0,1		
n	$\Delta\sigma$	N
1	294	205200
2	247	403000
3	241	635000
4	225	653000
5	211	1050000
6	200	1405000
7	162	2000000

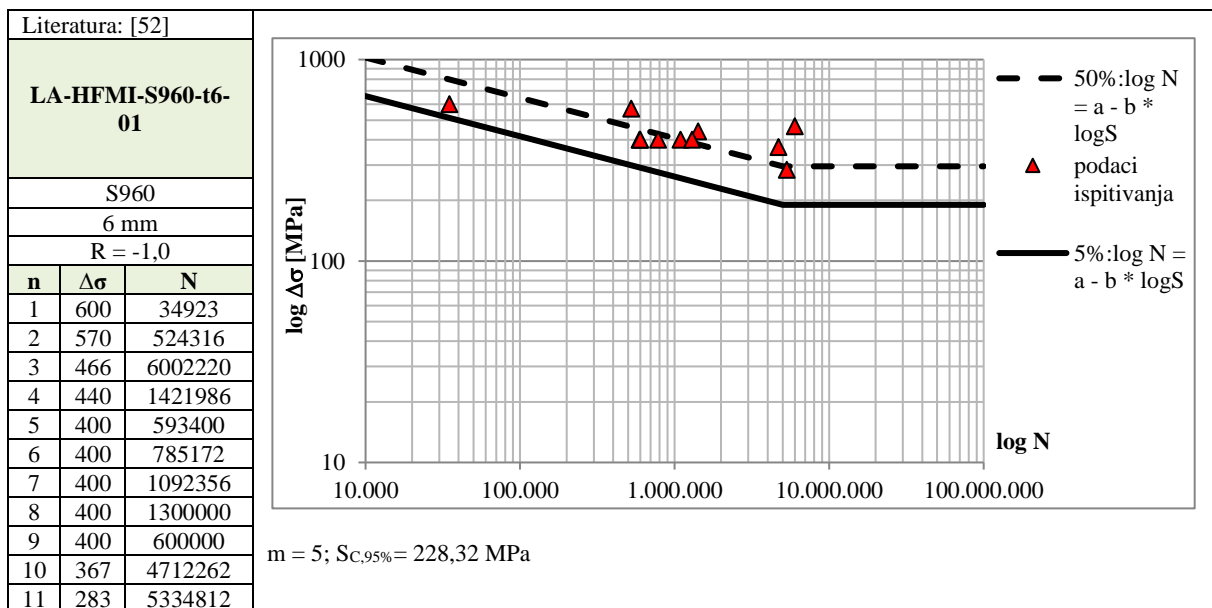
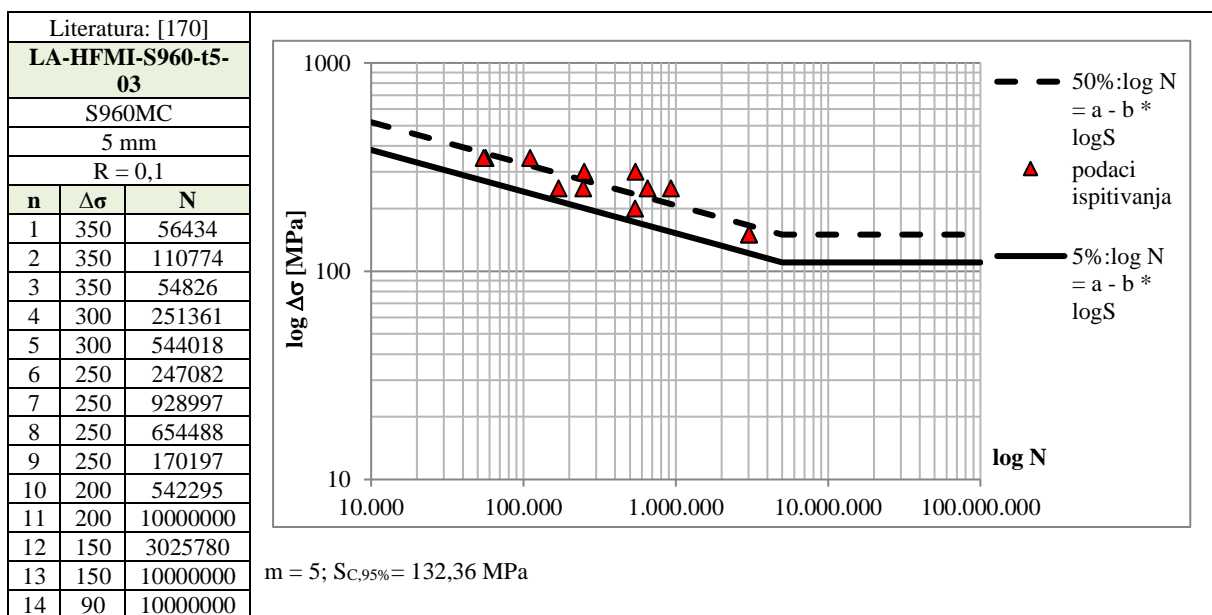
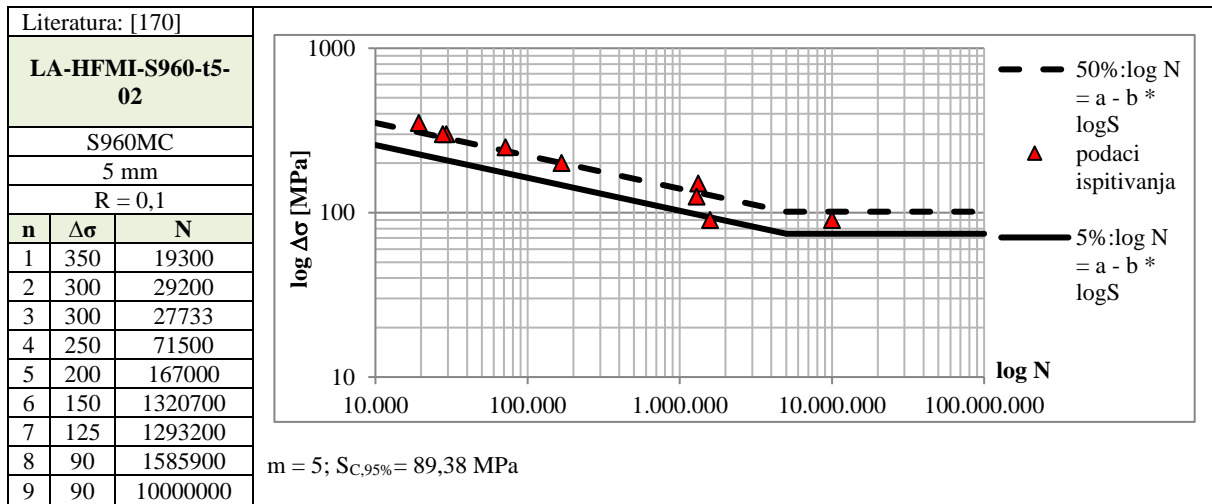


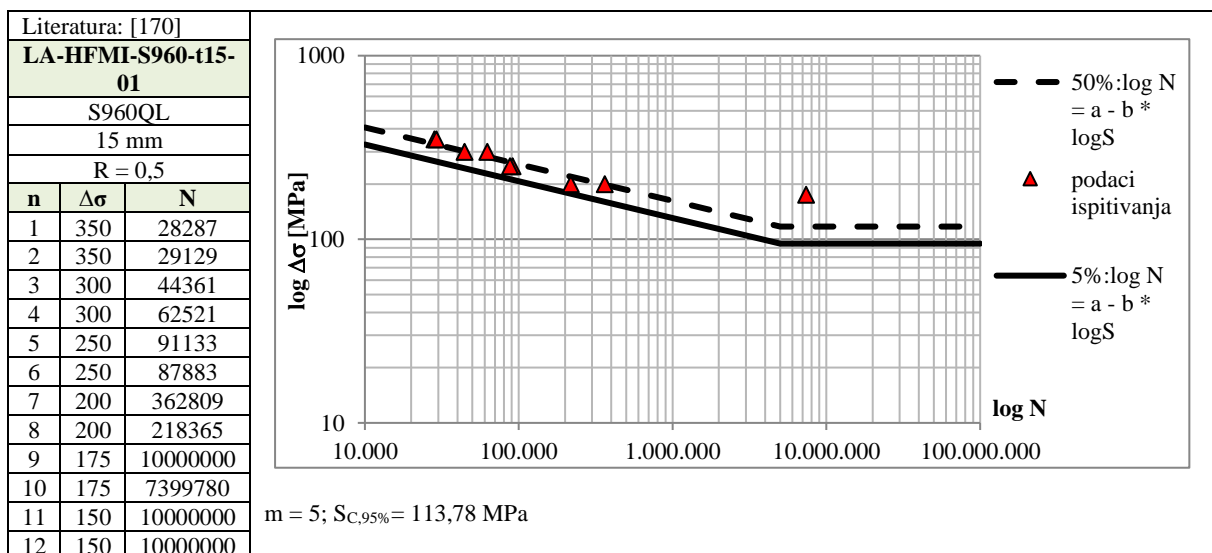
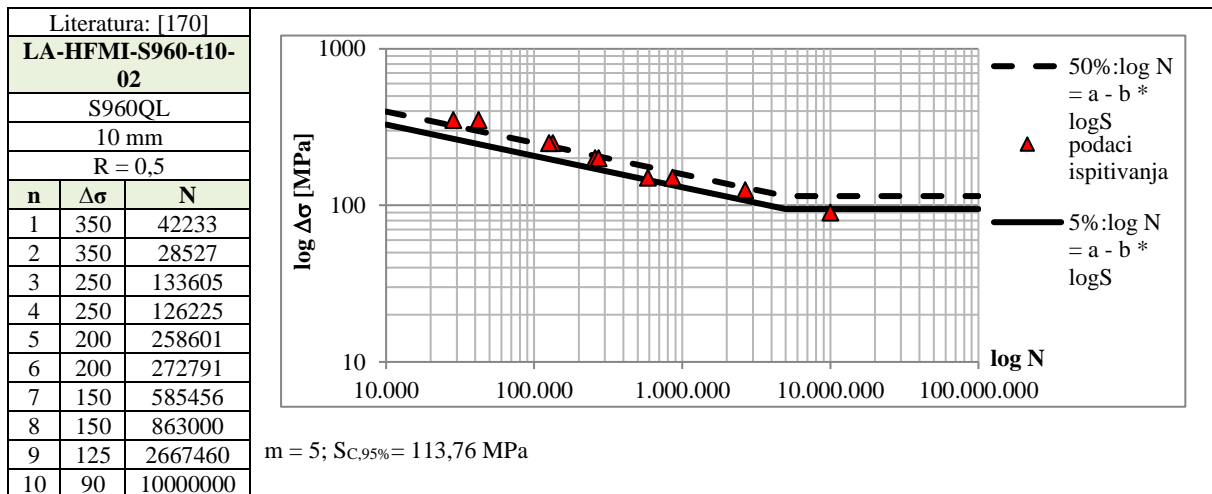
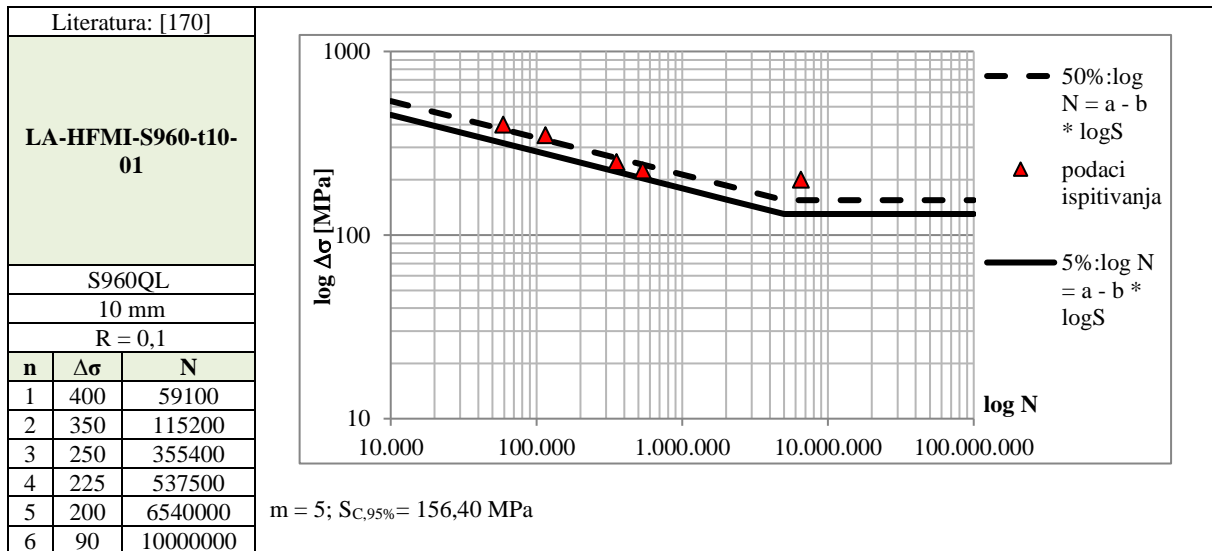
$m = 5$; $S_{C,95\%} = 157,81$ MPa

Literatura: [41]		
LA-HFMI-S960-t5-01		
S960		
5 mm		
R = 0,1		
n	$\Delta\sigma$	N
1	700	18272
2	600	32266
3	600	36696
4	500	136787
5	500	85693
6	400	276312
7	350	630259
8	350	557678
9	350	804910
10	325	1073244
11	300	7658700

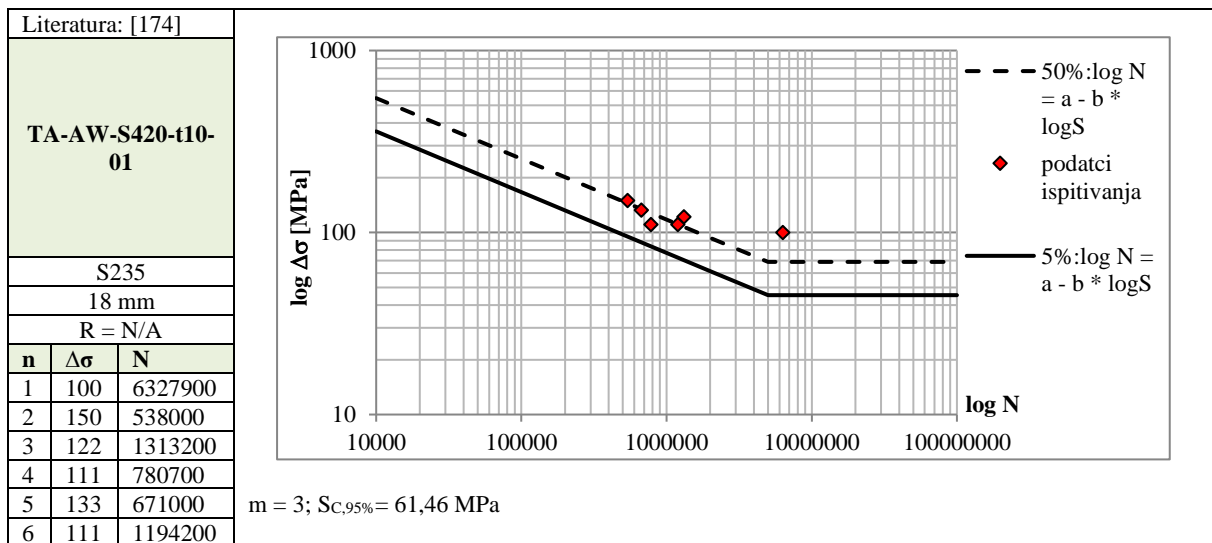
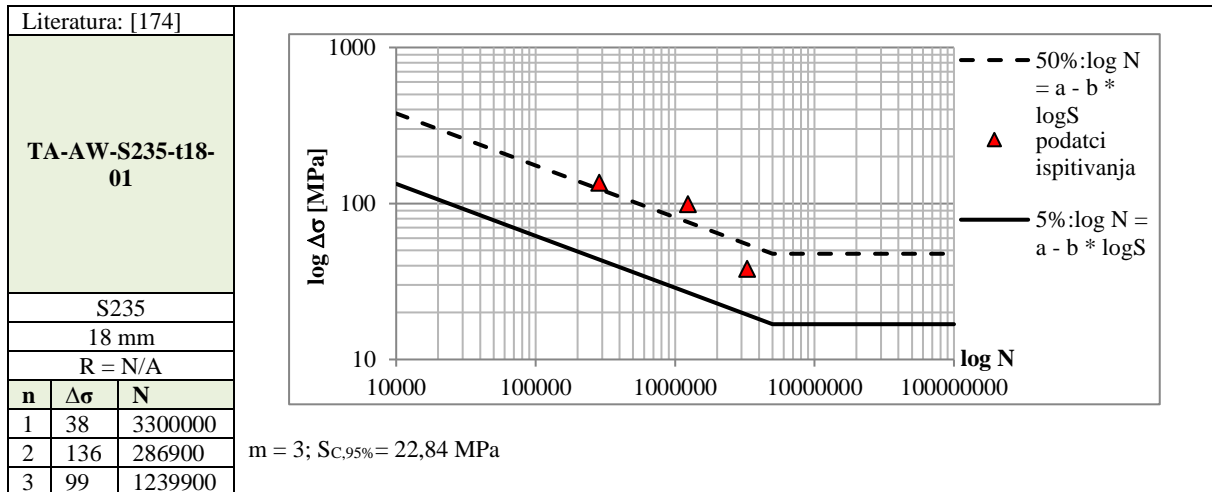
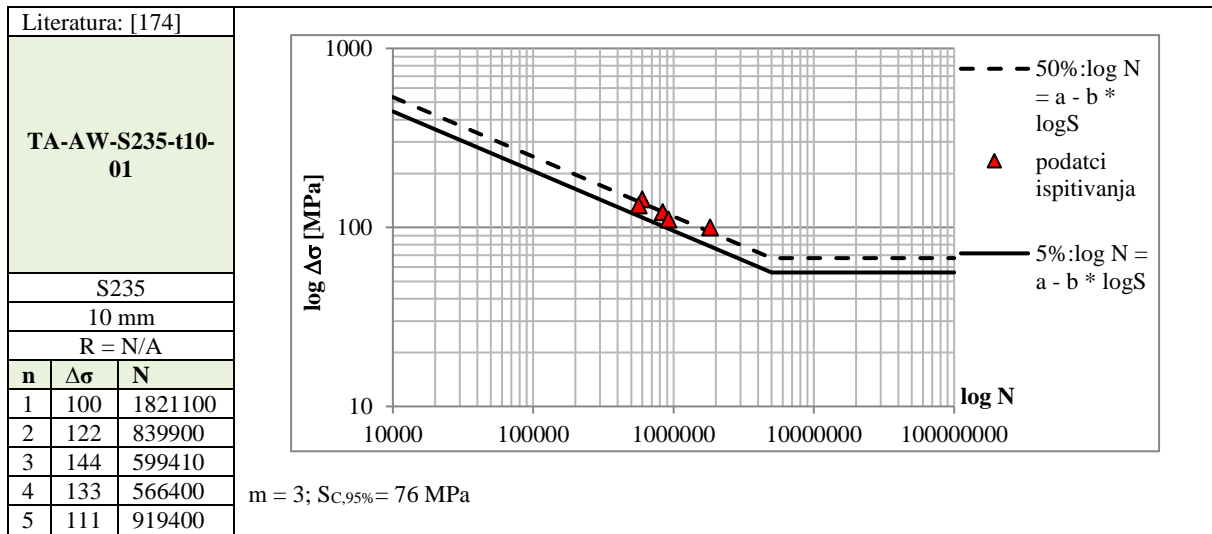


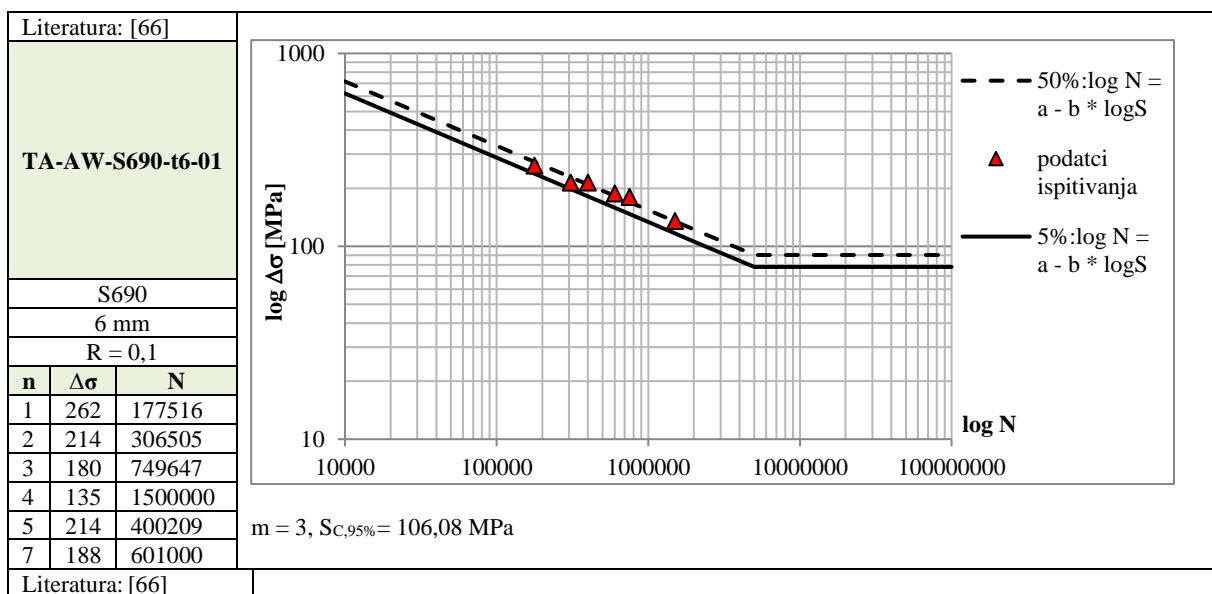
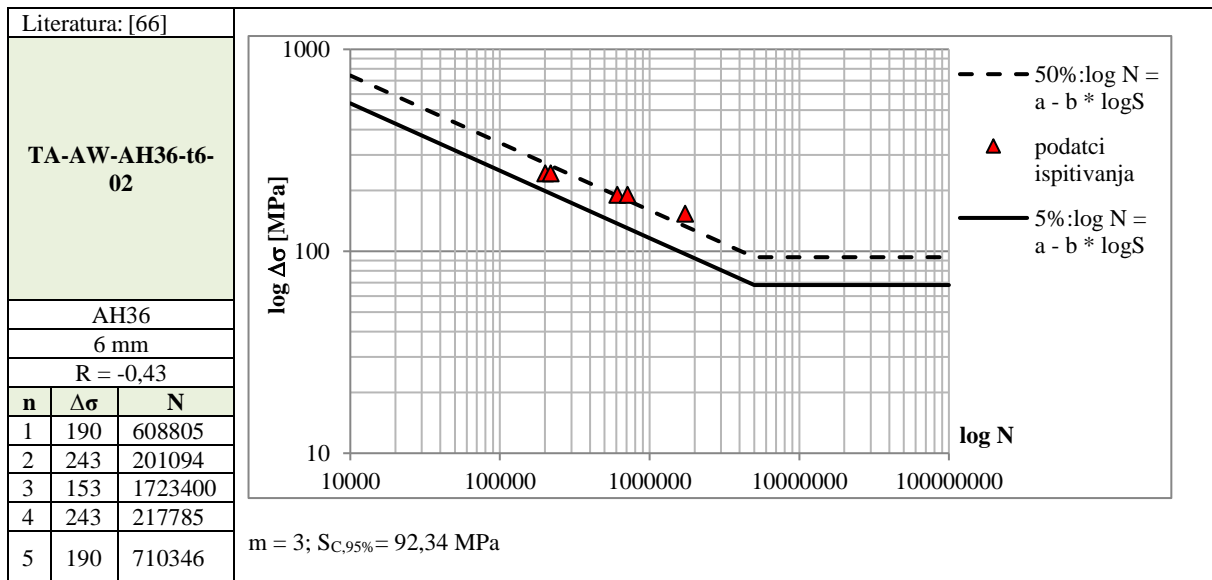
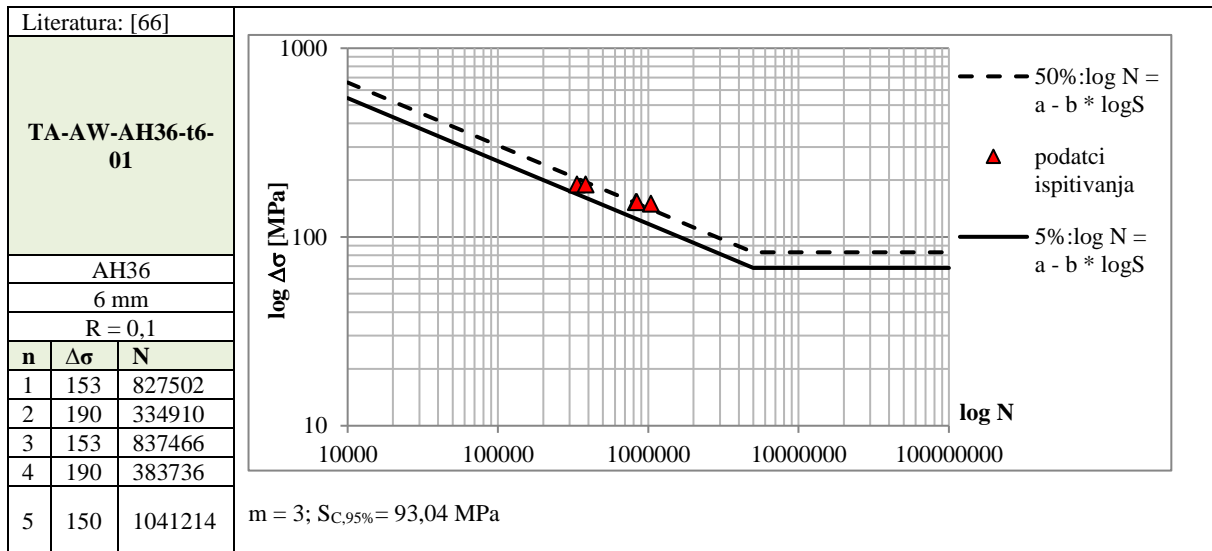
$m = 5$; $S_{C,95\%} = 200,48$ MPa

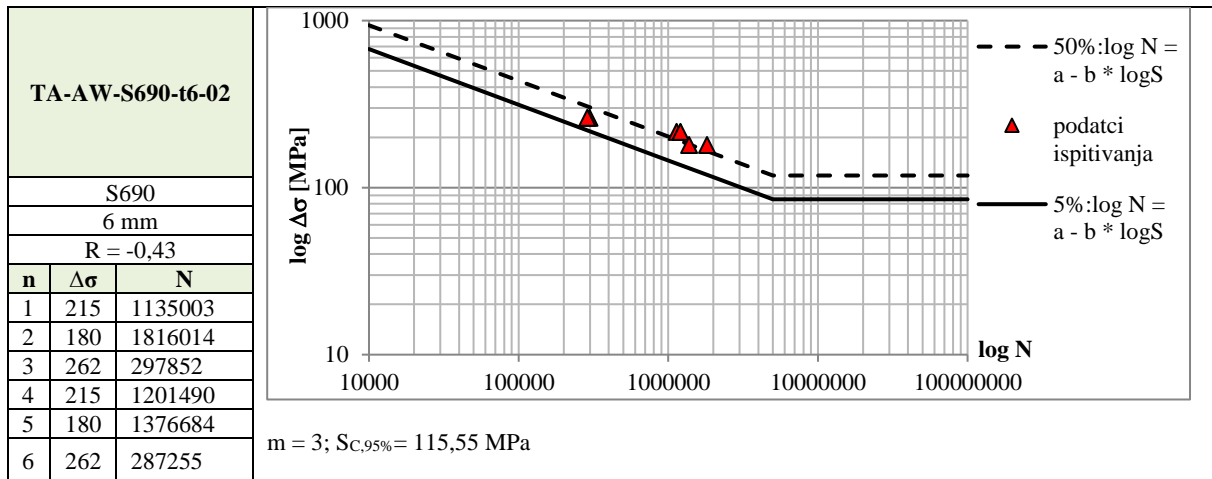




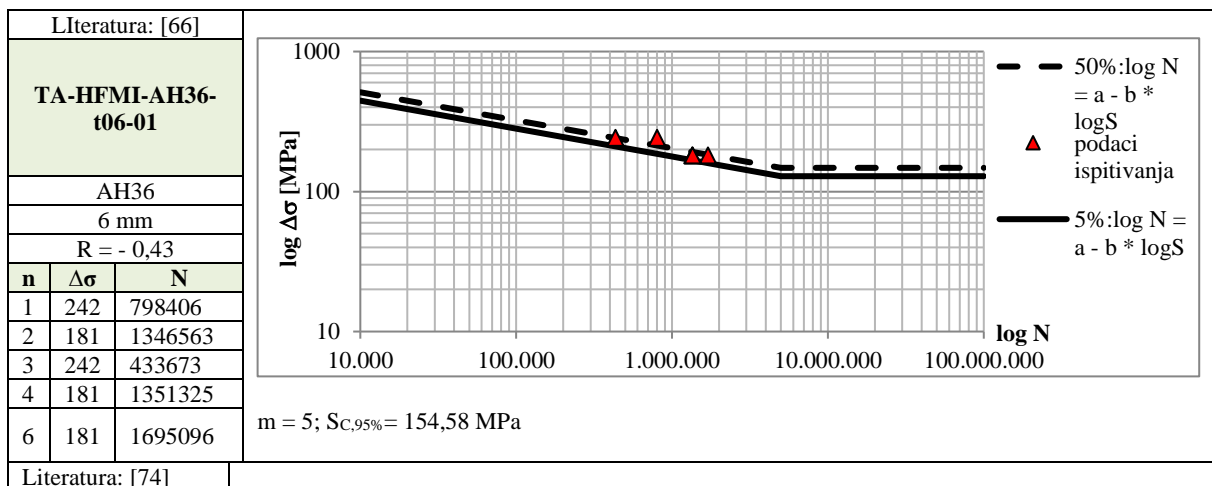
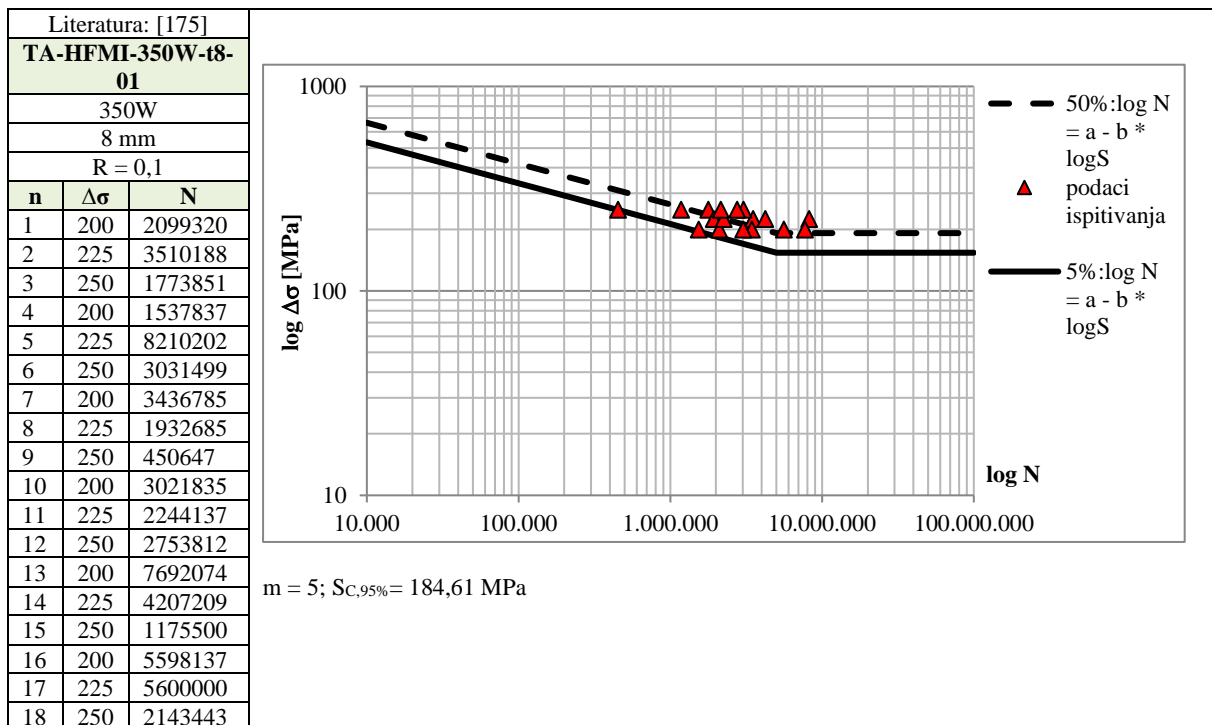
c) TA-AW detalji (m = 3)



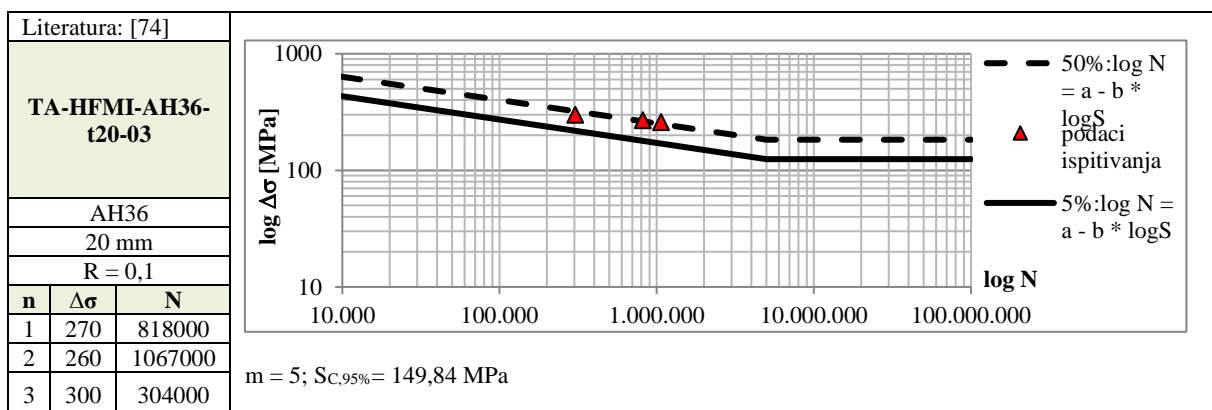
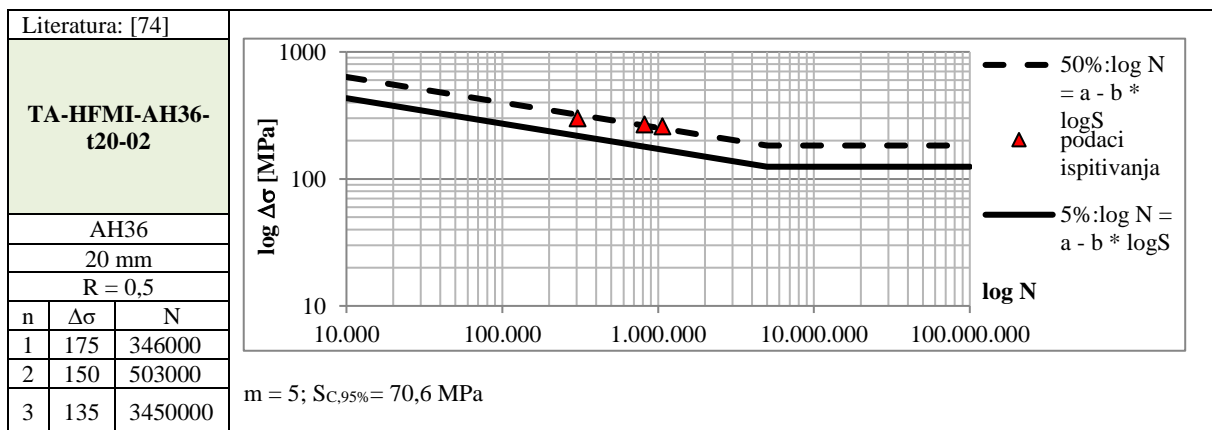
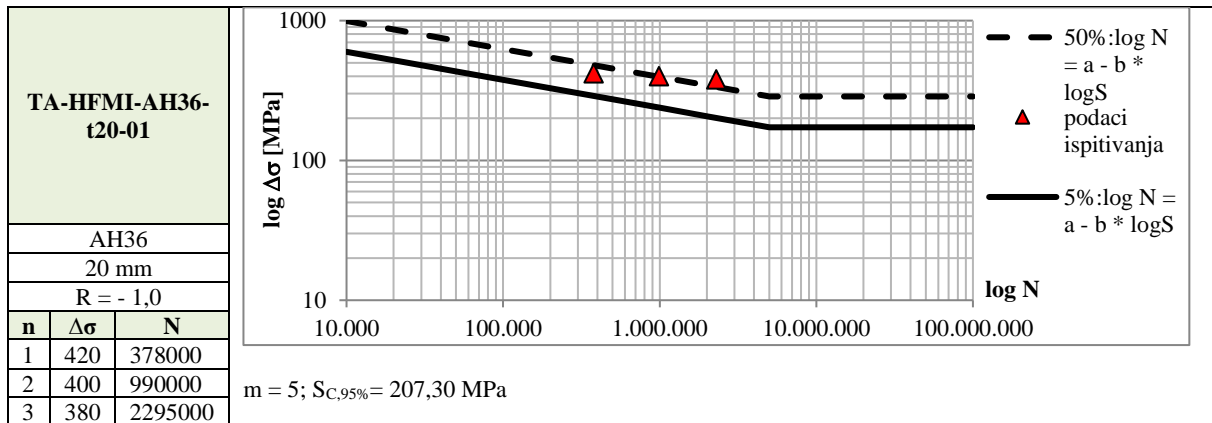


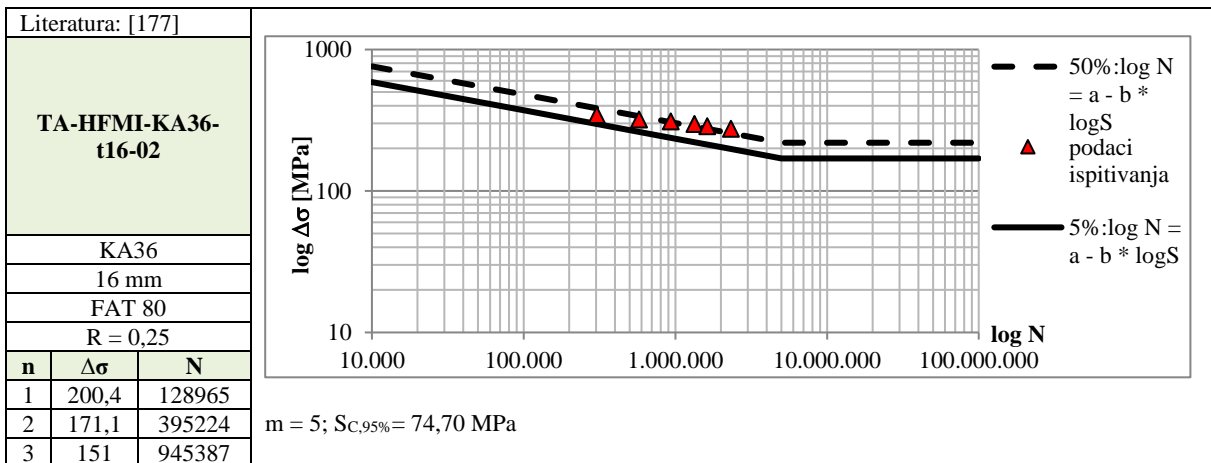
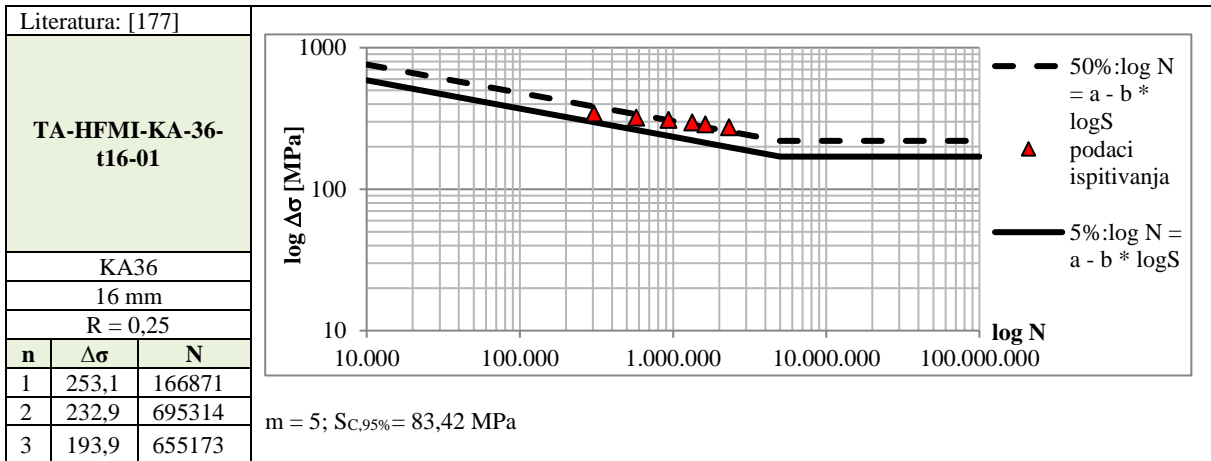
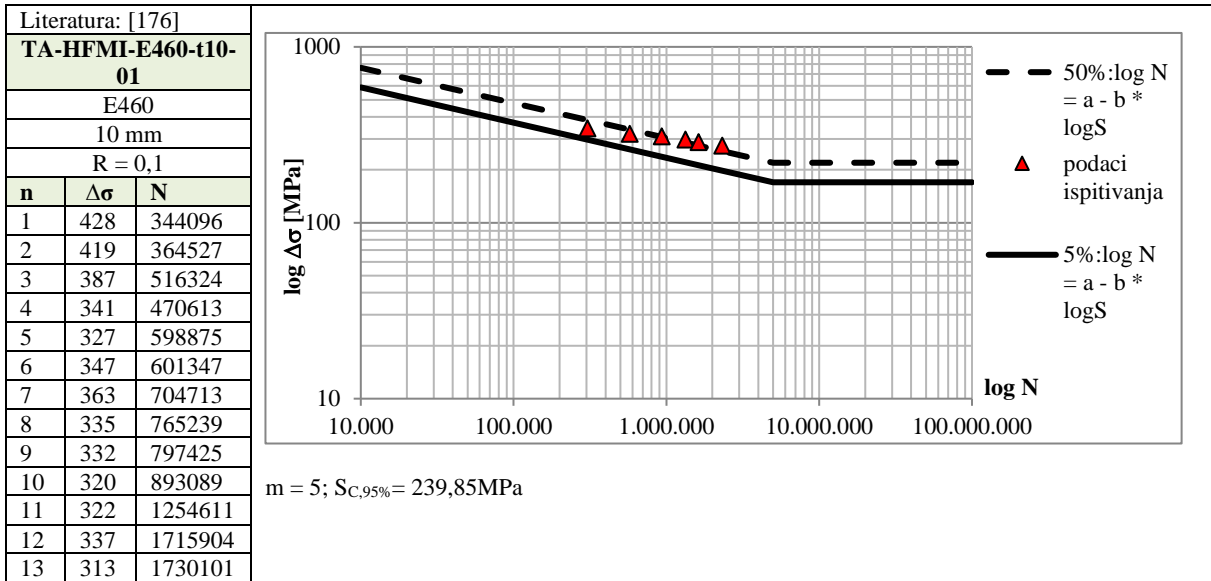


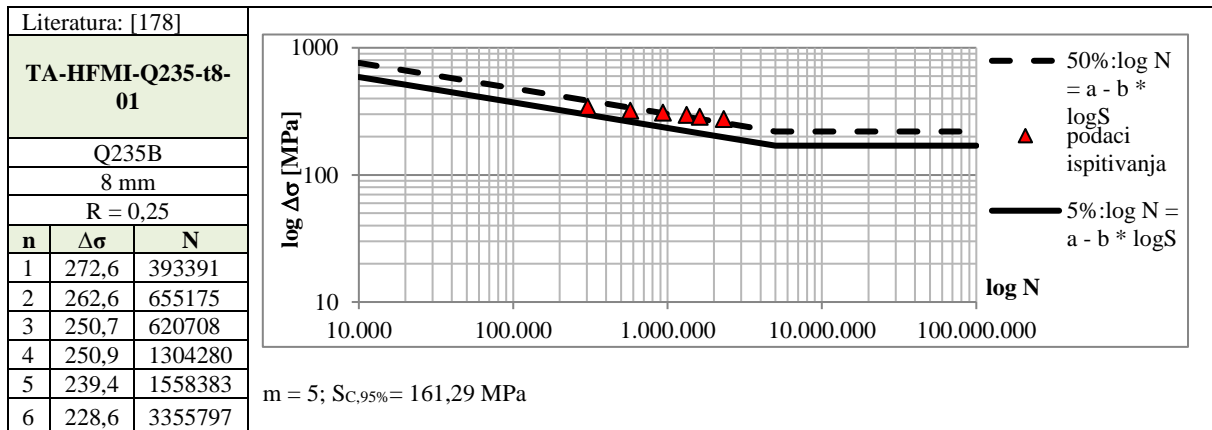
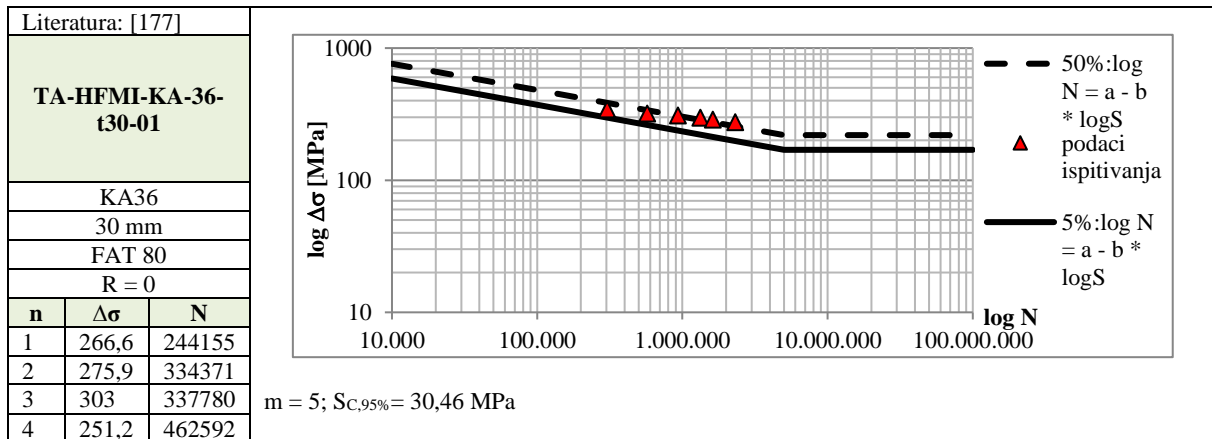
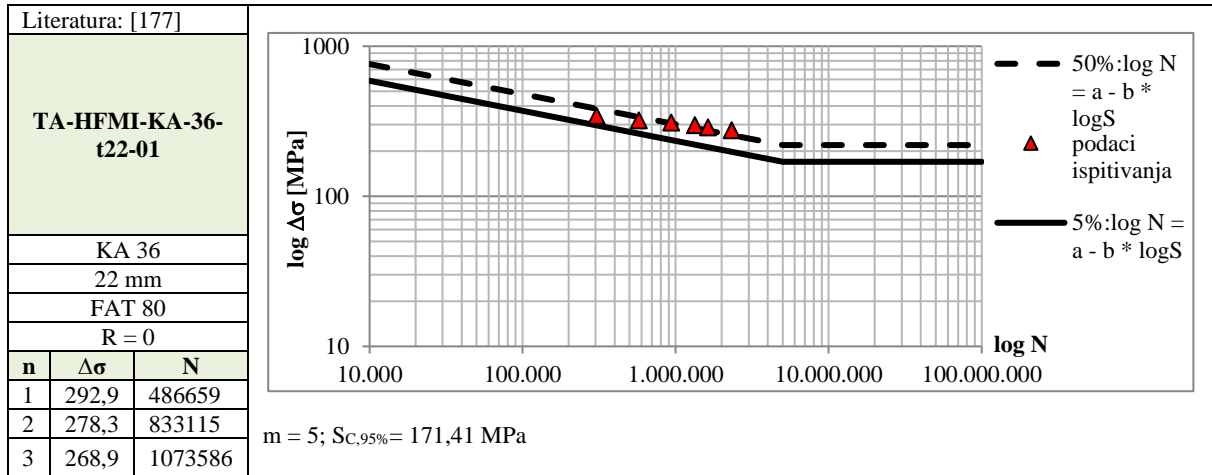
c) TA-HFMI detalji (m = 5)

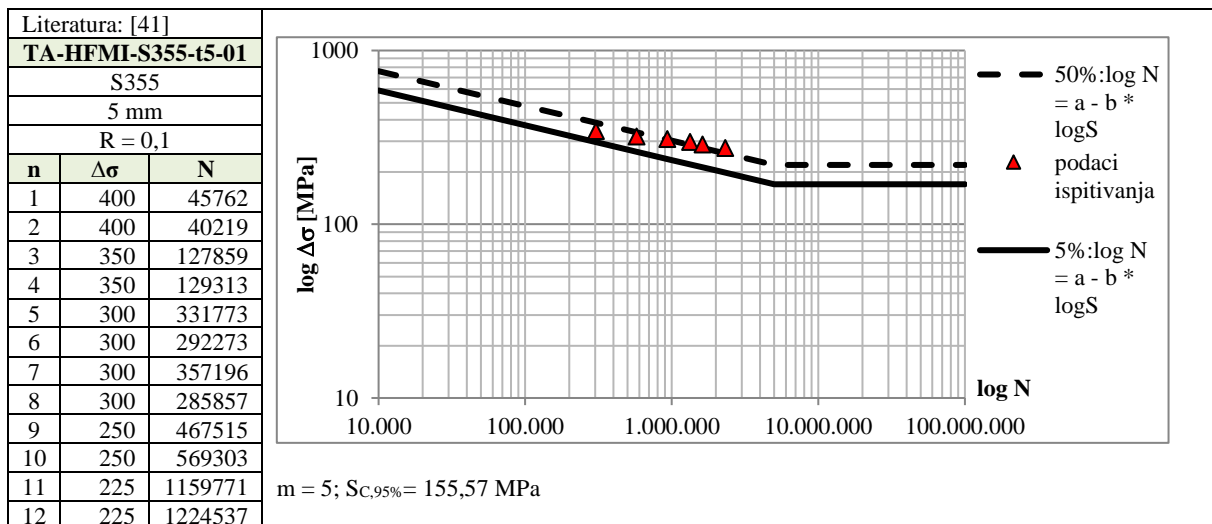
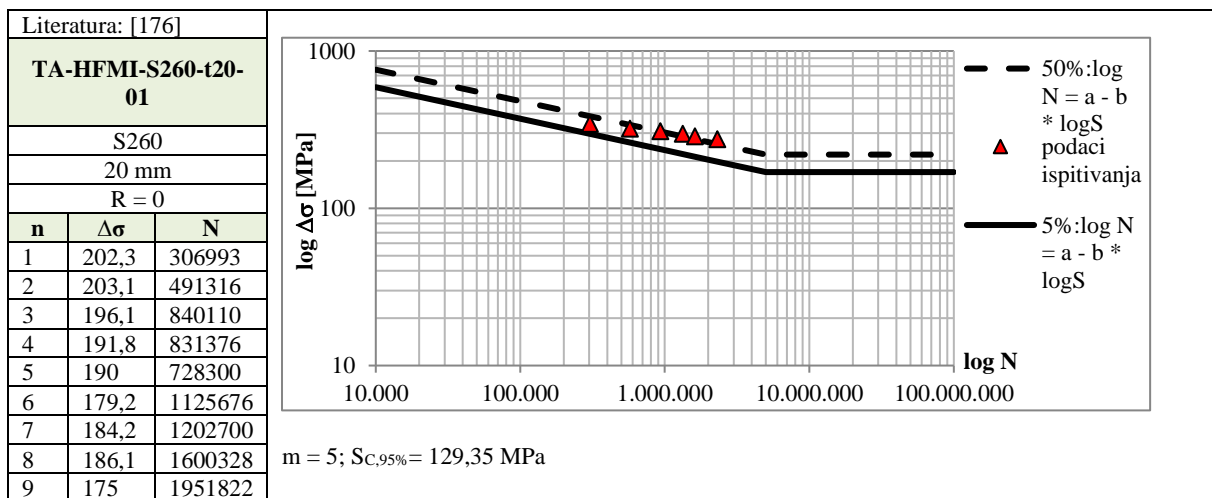
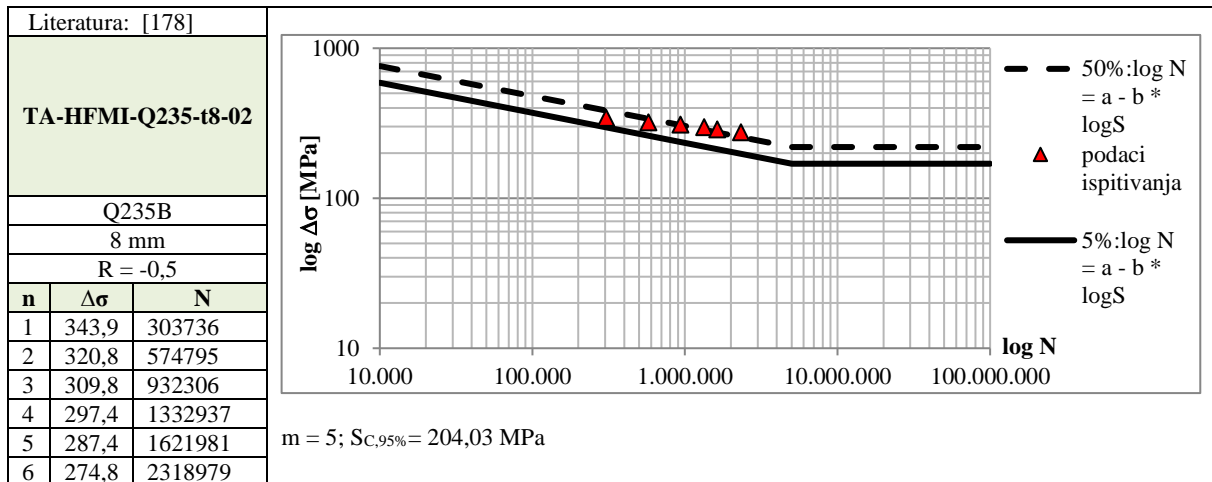


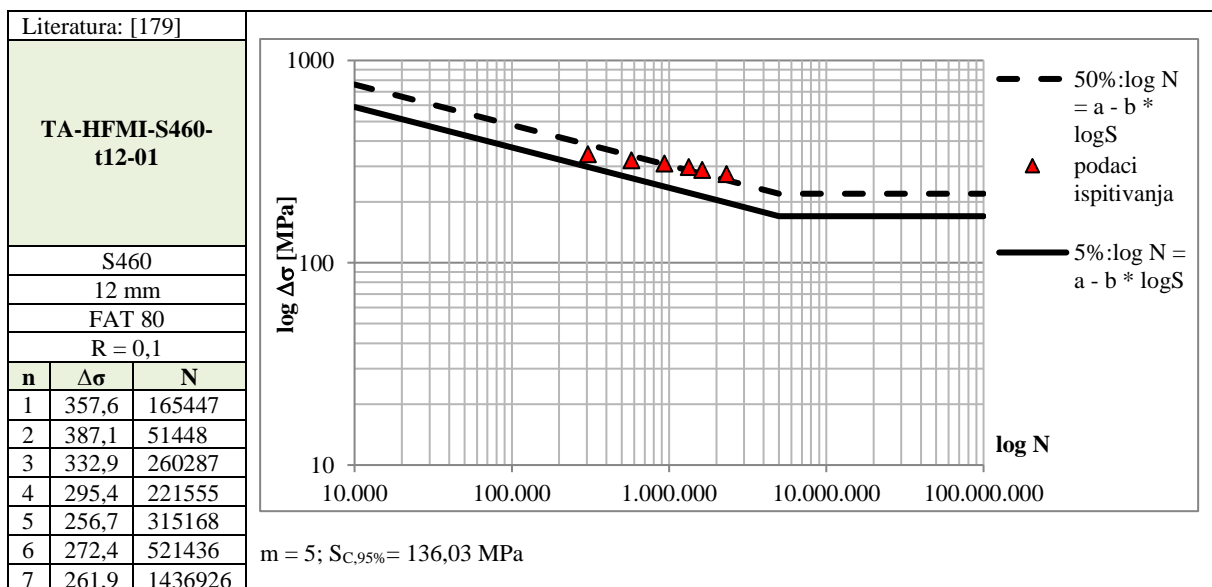
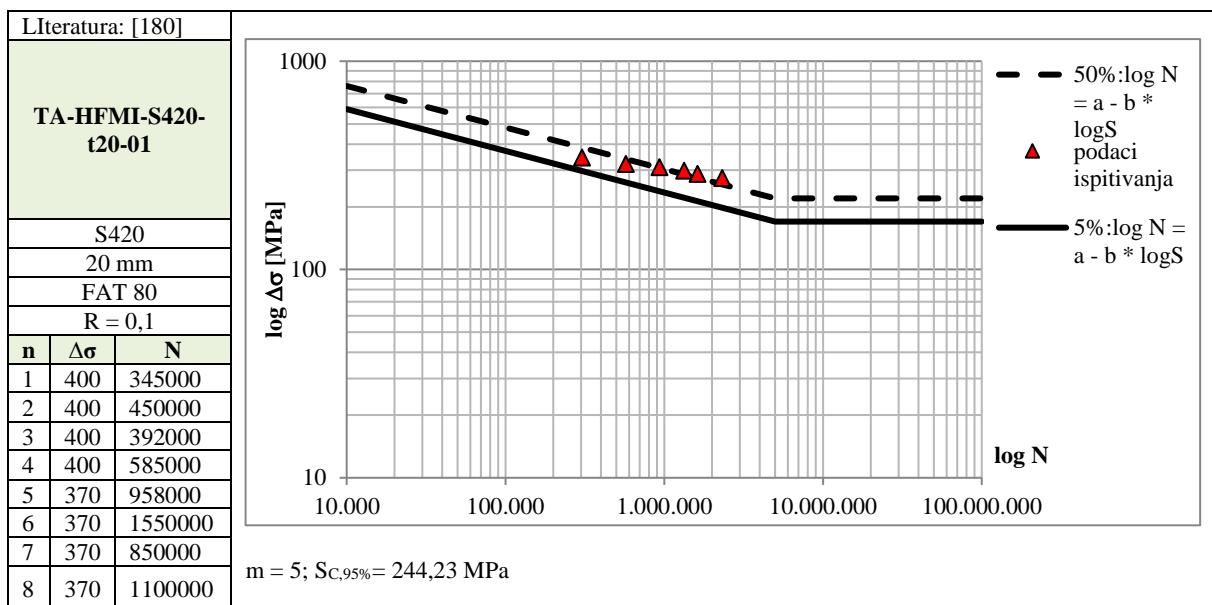
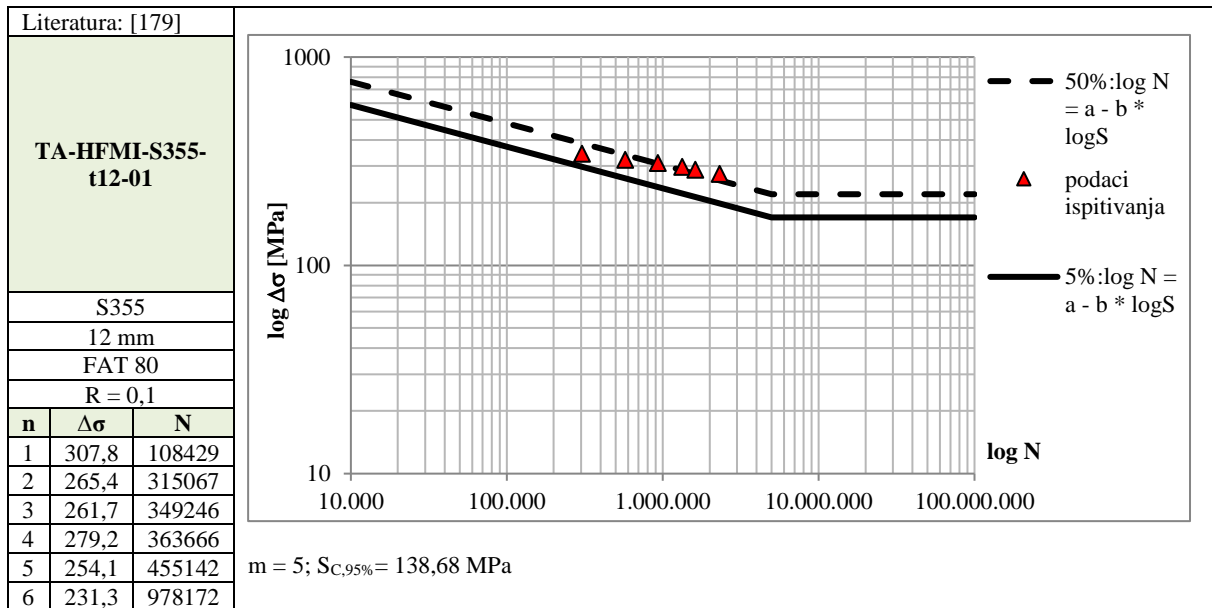
Literatura: [74]

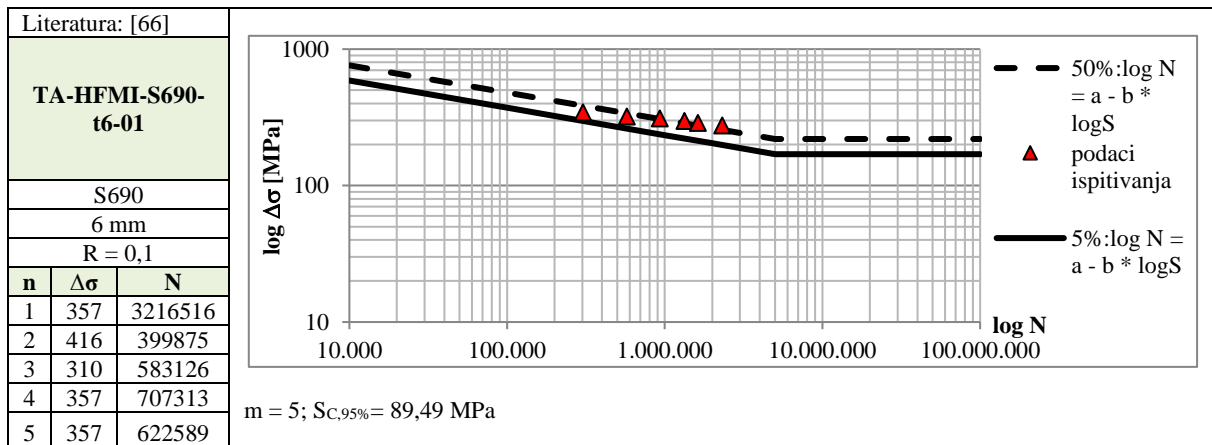
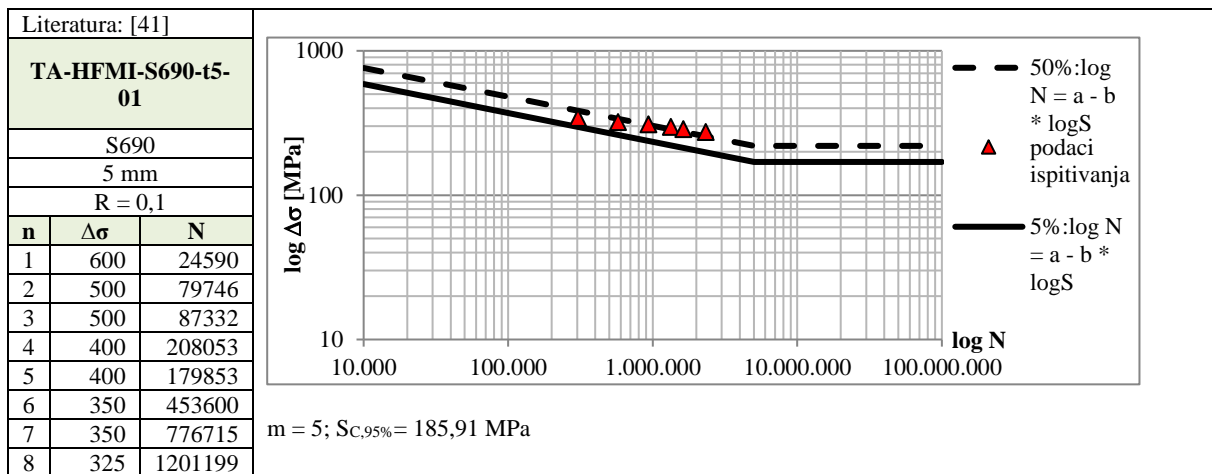
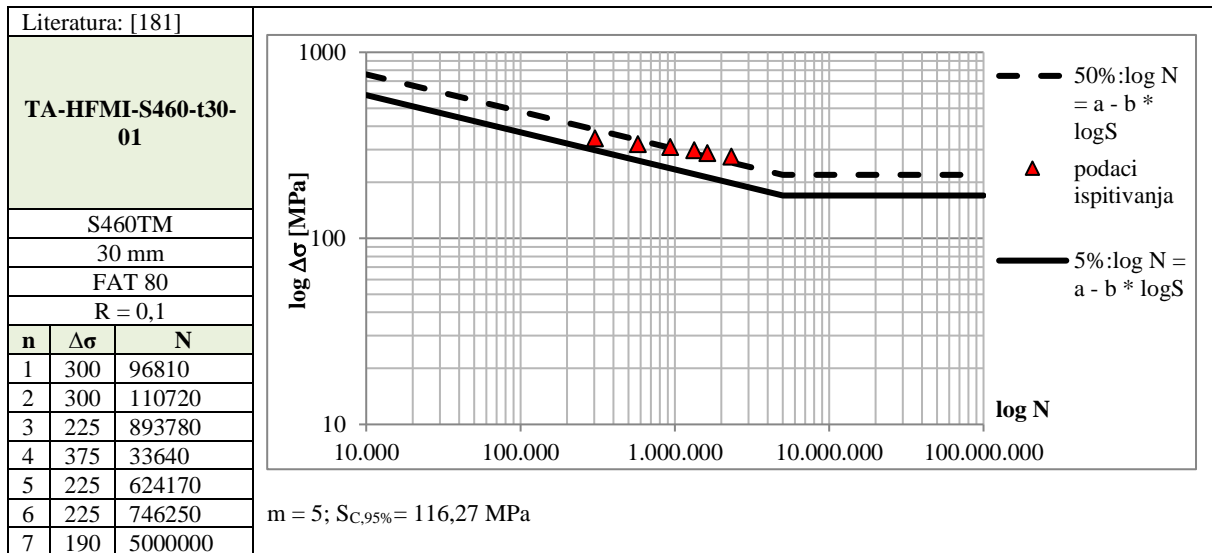


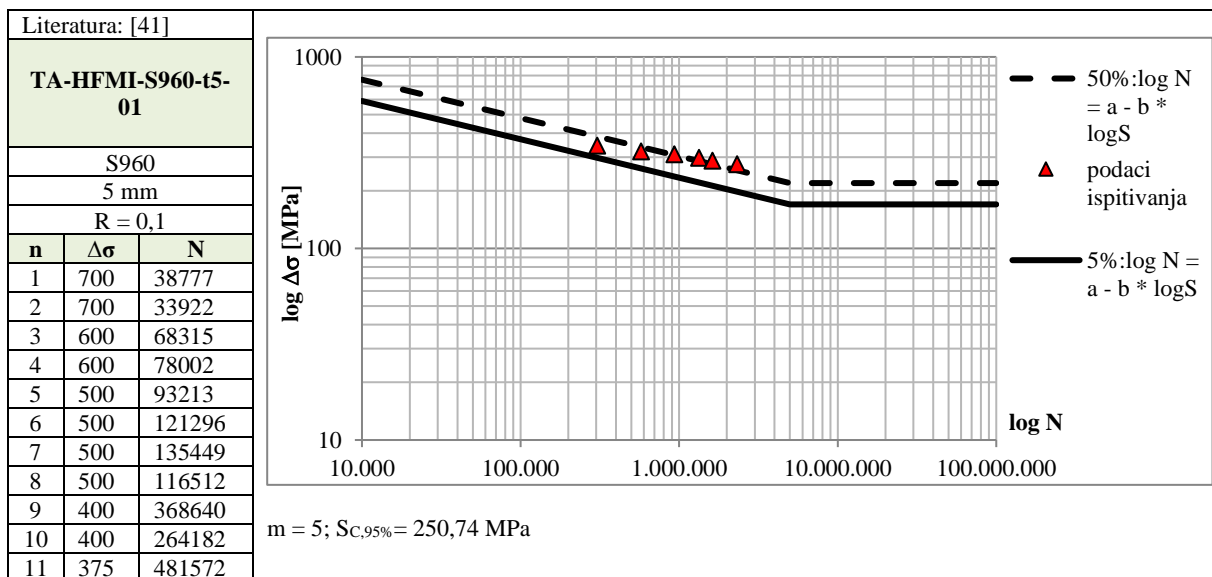
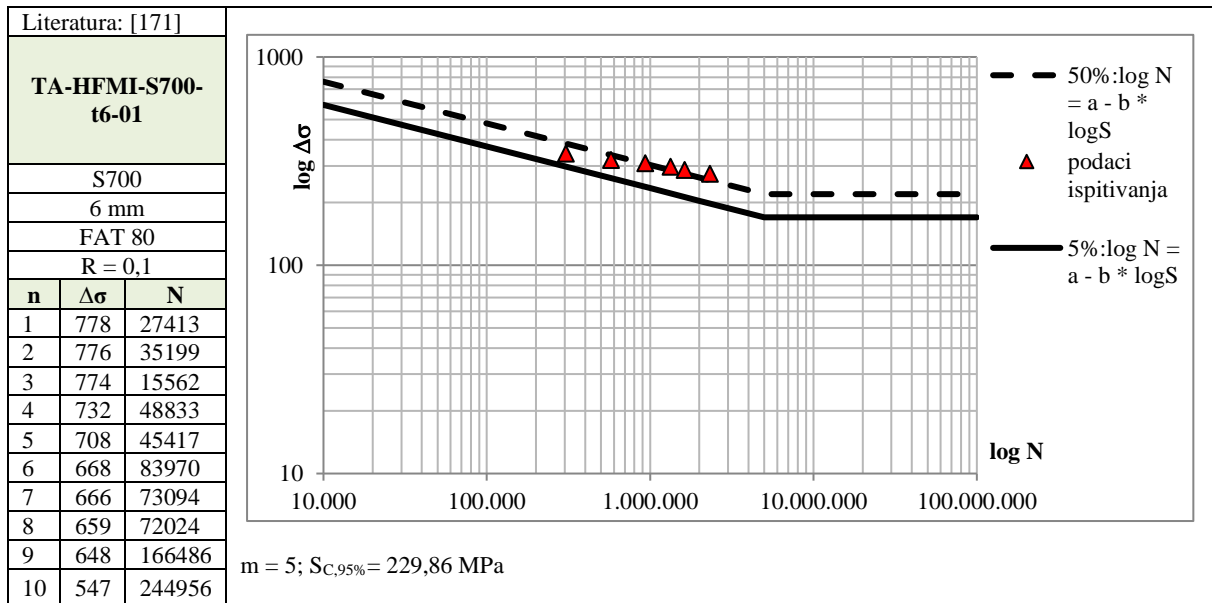
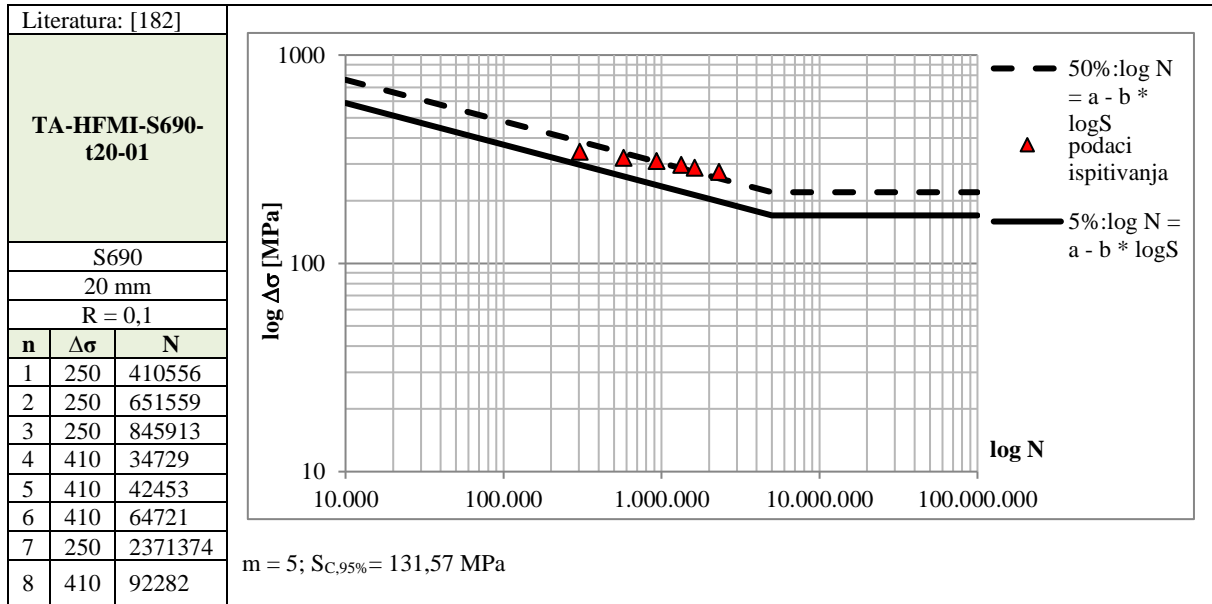


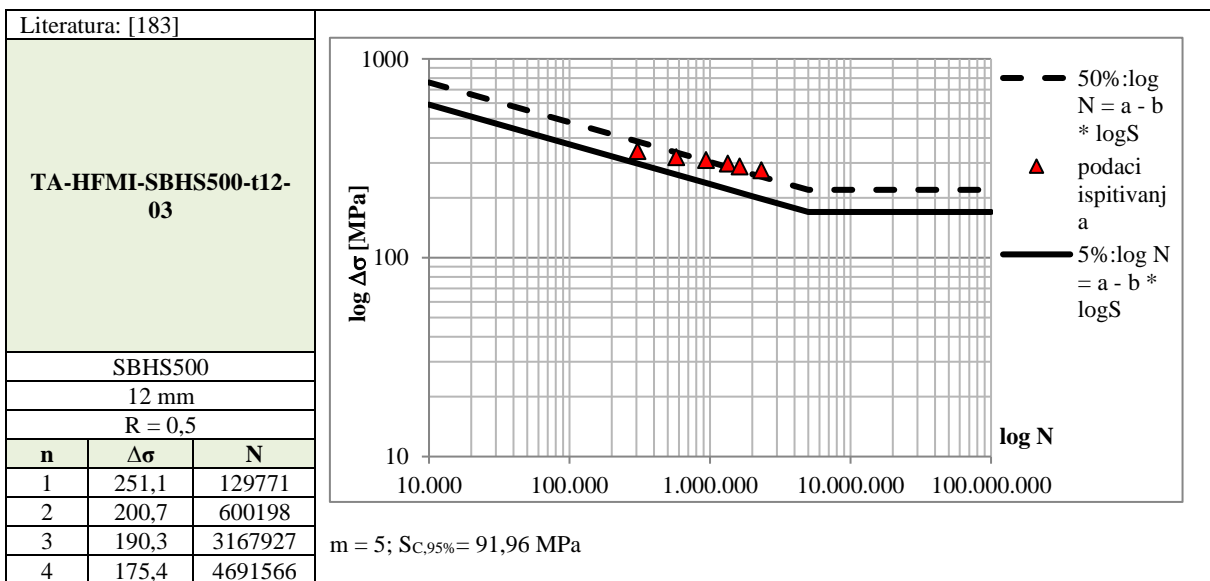
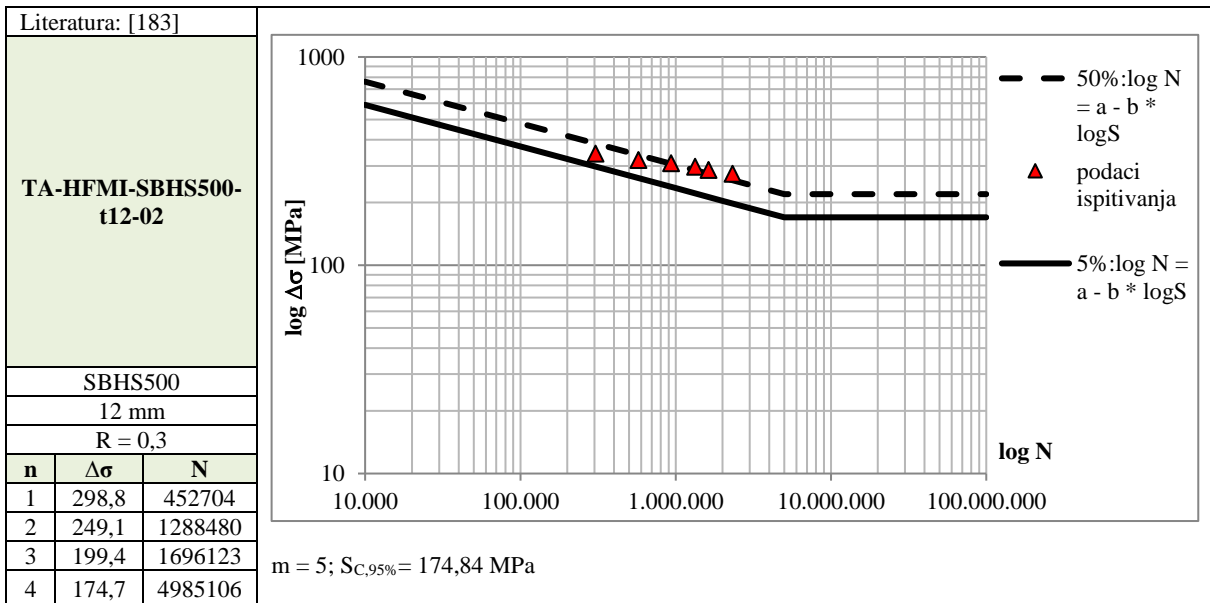
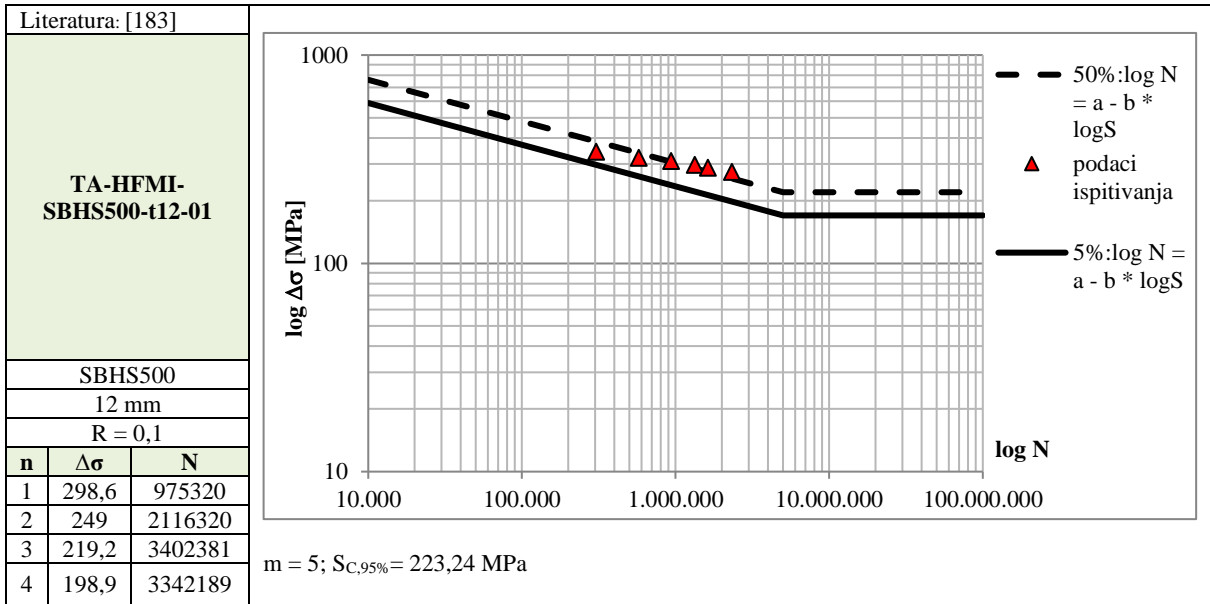










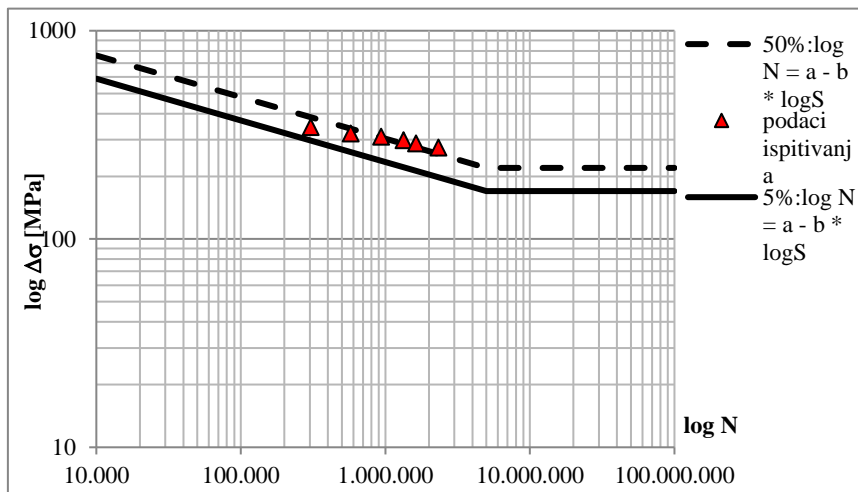


Literatura: [178]

TA-HFMI-SM490B-t16-01

SM490B
16 mm
R = 0,4

n	$\Delta\sigma$	N
1	300,7	102916
2	311	120389
3	300,7	203050
4	290,8	440135
5	275,8	704531
6	250,6	1048169
7	240,6	1419383



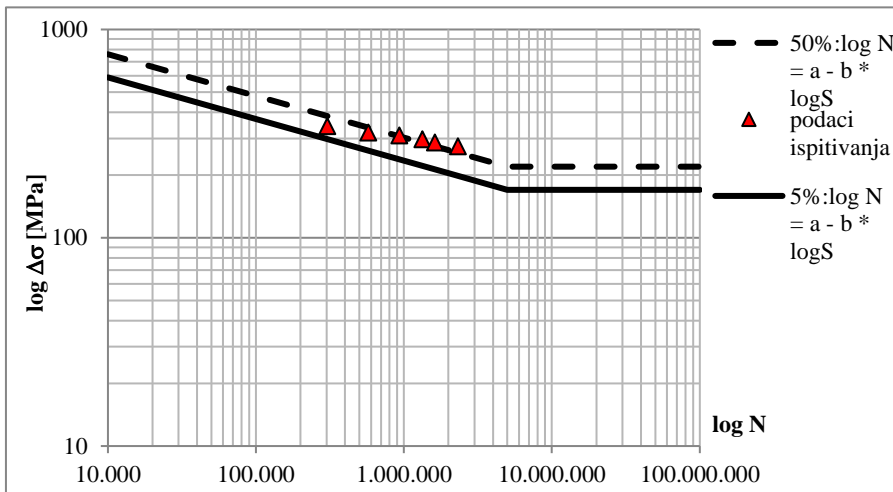
m = 5; $S_{C,95\%} = 131,49$ MPa

Literatura: [184]

TA-HFMI-USIFORM355-t5-01

Usiform 355
5 mm
R = 0,1

n	$\Delta\sigma$	N
1	520	111741
2	480	243920
3	480	308952
4	440	646047
5	440	800898
6	419	1266613
7	400	1179070
8	380	1773510
9	380	2091093



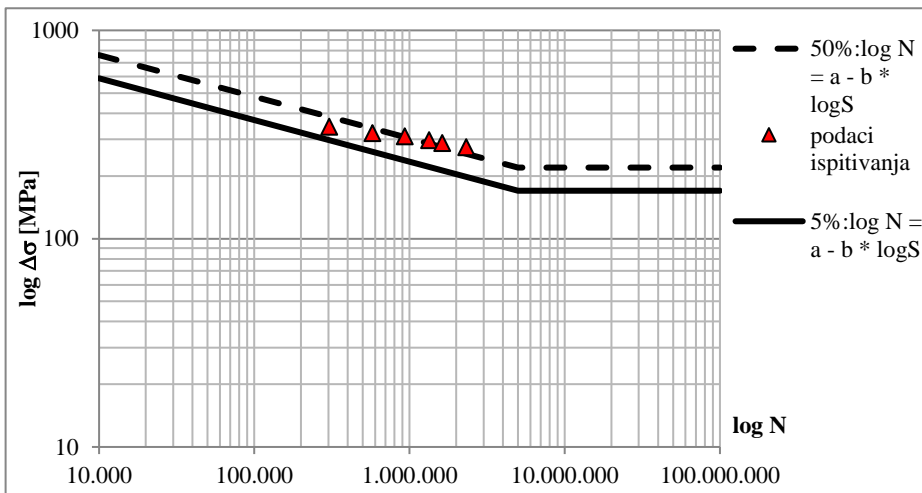
m = 5; $S_{C,95\%} = 255,61$ MPa

Literatura: [184]

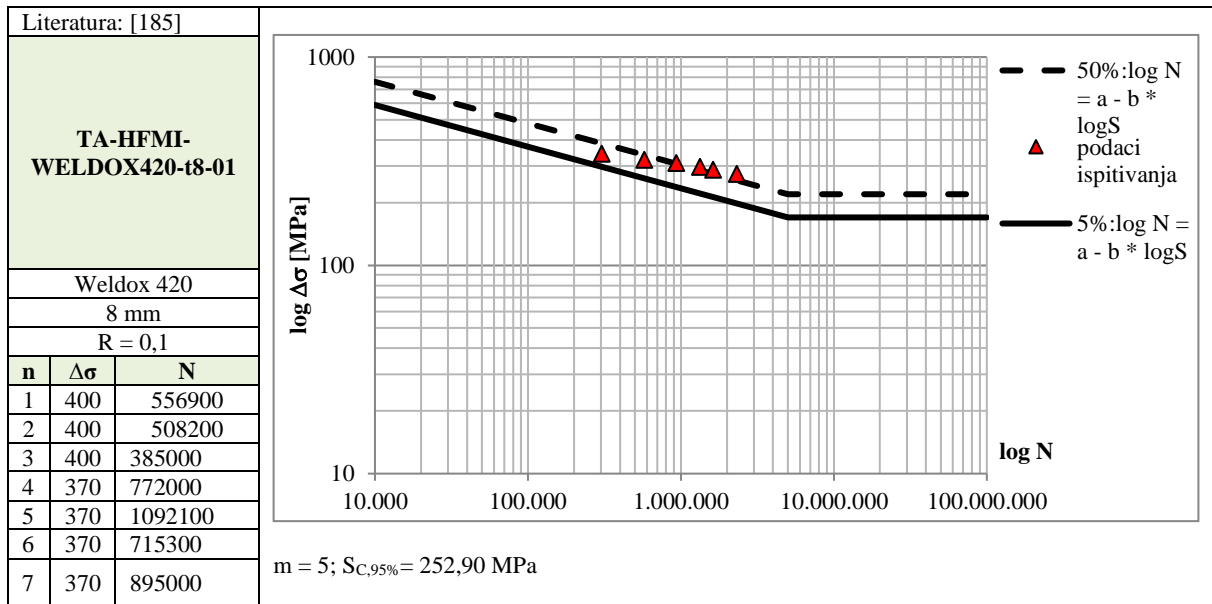
TA-HFMI-USIFORM700-t5-01

Usiform 700
5 mm
FAT 80
R = 0,1

n	$\Delta\sigma$	N
1	680	59497
2	681	163329
3	641	81537
4	641	225441
5	601	495654
6	601	1196081
7	561	830097
8	561	481656
9	520	724488
10	520	860362
11	520	1851382
12	480	2804791



m = 5; $S_{C,95\%} = 298,89$ MPa



PRILOG B – GEOMETRIJSKI PARAMETRI HFMI OBRADENOG RUBA ZAVARA

Geometrijski parametri mjereni u GOM Inspectu na 3D skeniranim modelima HFMI obrađenih uzoraka od čelika S355J2+N prikazani su tablicama 1 – 6.

Tablica 1. Geometrijski parametri za detalj S355-LA-HFMI-01

Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +3,00 mm	0,51	0,49	0,59	1,01	3,59	3,75	2,16	2,04
Y +0,00 mm	0,49	0,37	0,53	0,79	3,86	3,71	2,47	2,07
Y -3,00 mm	0,42	0,43	0,84	0,94	3,71	3,56	2,30	2,03

Tablica 2. Geometrijski parametri za detalj S355-LA-HFMI-02

Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +3,00 mm	0,53	0,42	0,25	0,63	3,58	3,92	2,41	2,11
Y +0,00 mm	0,37	0,40	0,77	0,23	3,85	4,02	2,29	2,01
Y -3,00 mm	0,48	0,41	0,65	0,44	4,13	3,75	2,42	2,11

Tablica 3. Geometrijski parametri za detalj S355-LA-HFMI-03

Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +3,00 mm	0,51	0,41	0,35	0,48	4,37	3,95	2,44	2,36
Y +0,00 mm	0,59	0,39	0,55	0,77	4,19	3,94	2,39	2,42
Y -3,00 mm	0,49	0,35	0,44	0,52	4,22	3,98	3,19	2,32

Tablica 4. Geometrijski parametri za detalj S355-TA-HFMI-01

Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +12,00 mm	0,53	0,41	0,27	0,49	3,60	3,76	2,14	2,51
Y +0,00 mm	0,46	0,37	0,25	0,53	4,09	4,19	2,07	2,52
Y -12,00 mm	0,54	0,46	0,18	0,27	3,91	4,22	2,12	2,70

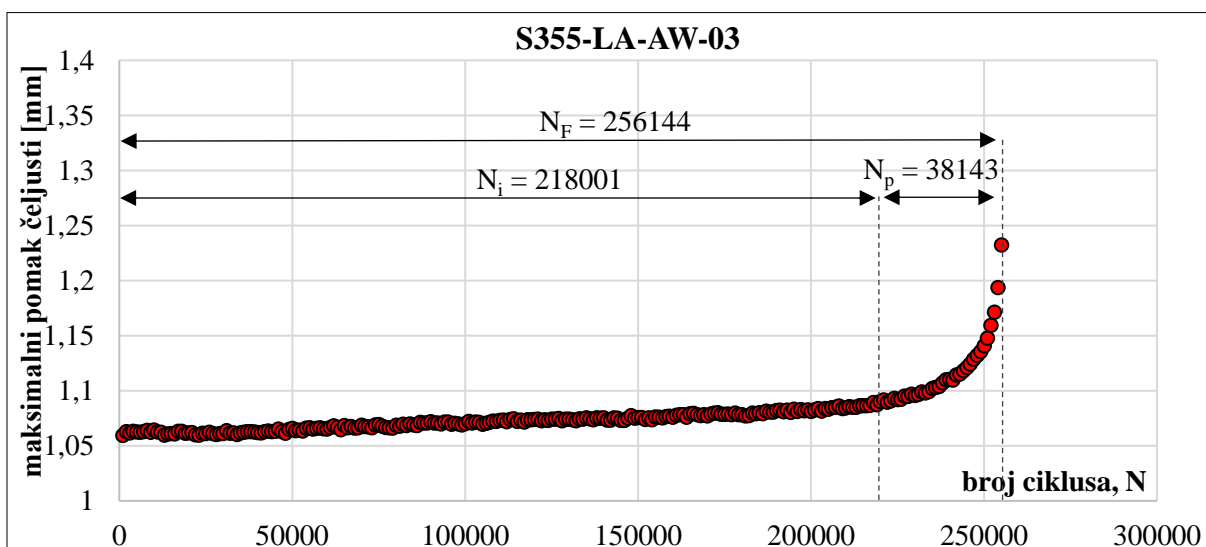
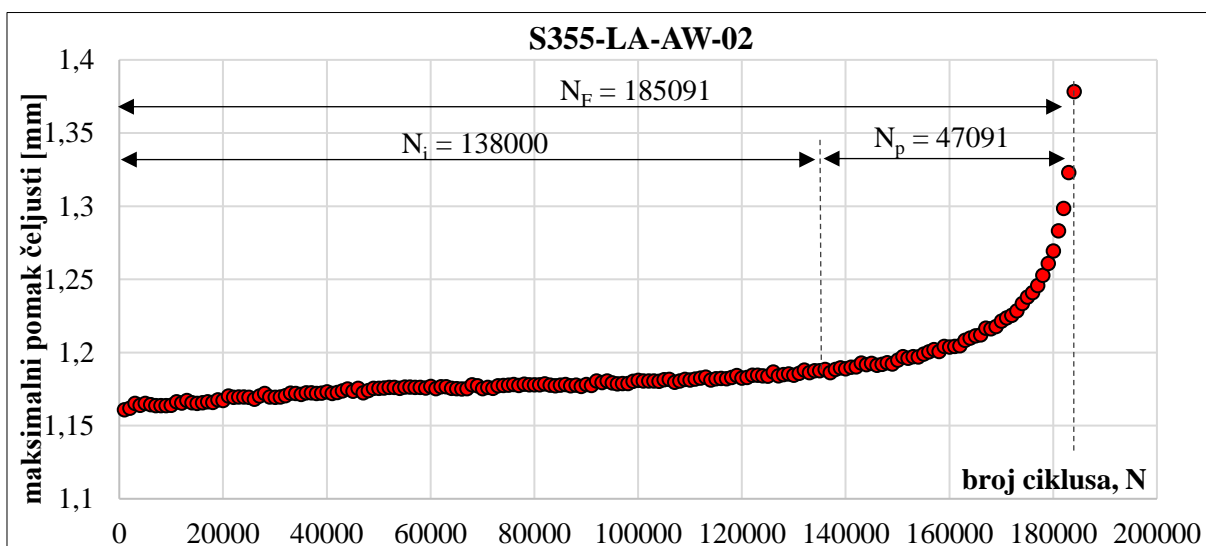
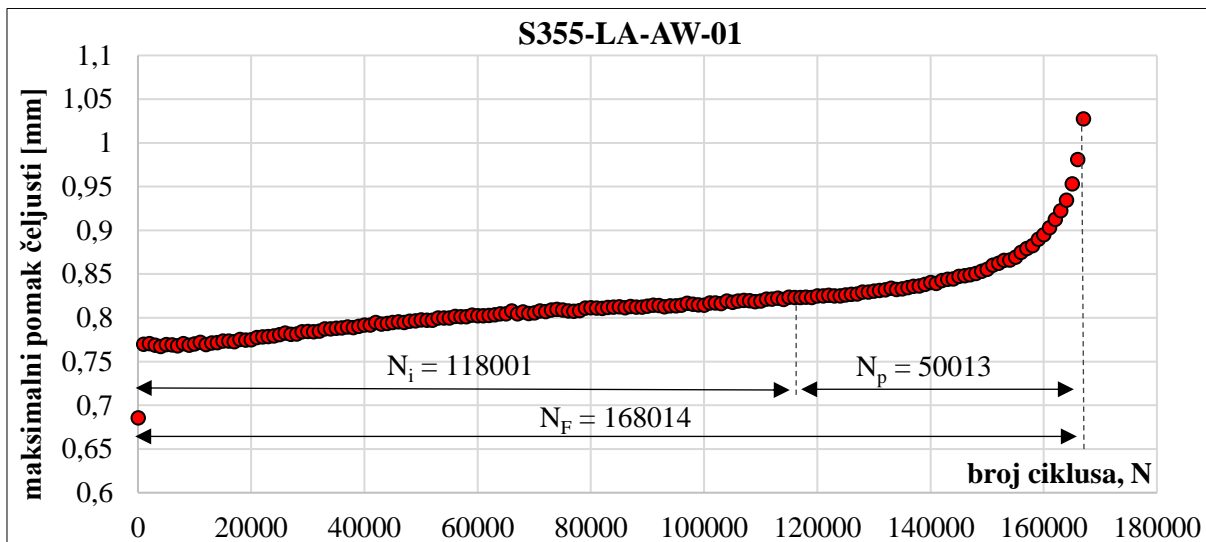
Tablica 5. Geometrijski parametri za detalj S355-TA-HFMI-02

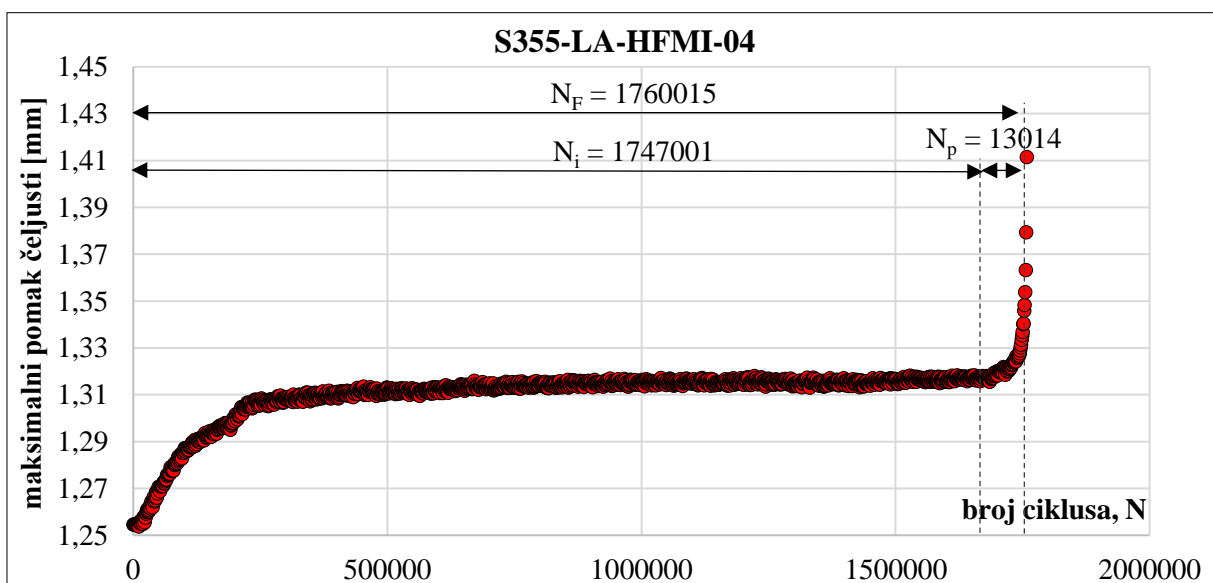
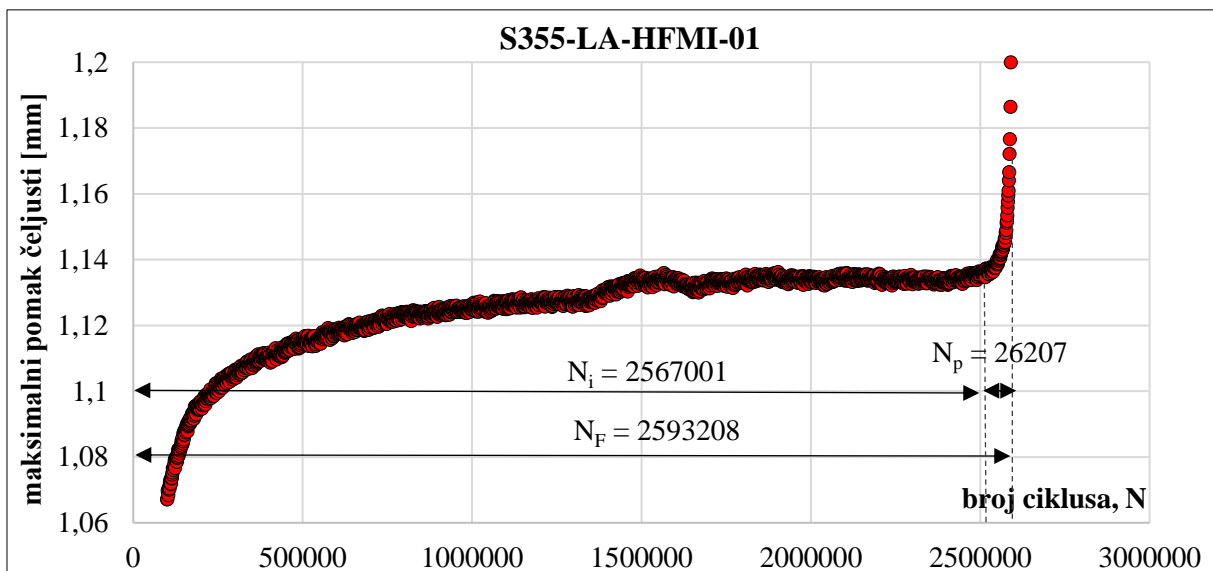
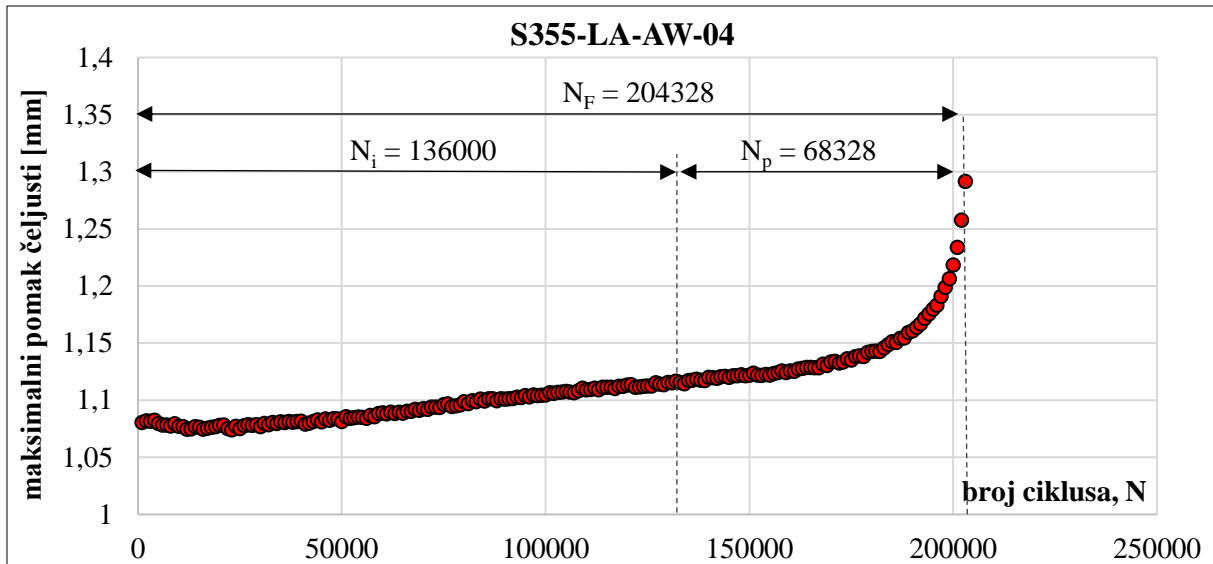
Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +12,00 mm	0,42	0,55	0,15	0,22	3,55	3,90	2,11	2,56
Y +0,00 mm	0,55	0,59	0,16	0,41	4,03	3,88	2,08	2,09
Y -12,00 mm	0,43	0,55	0,22	0,25	3,54	3,90	2,11	2,18

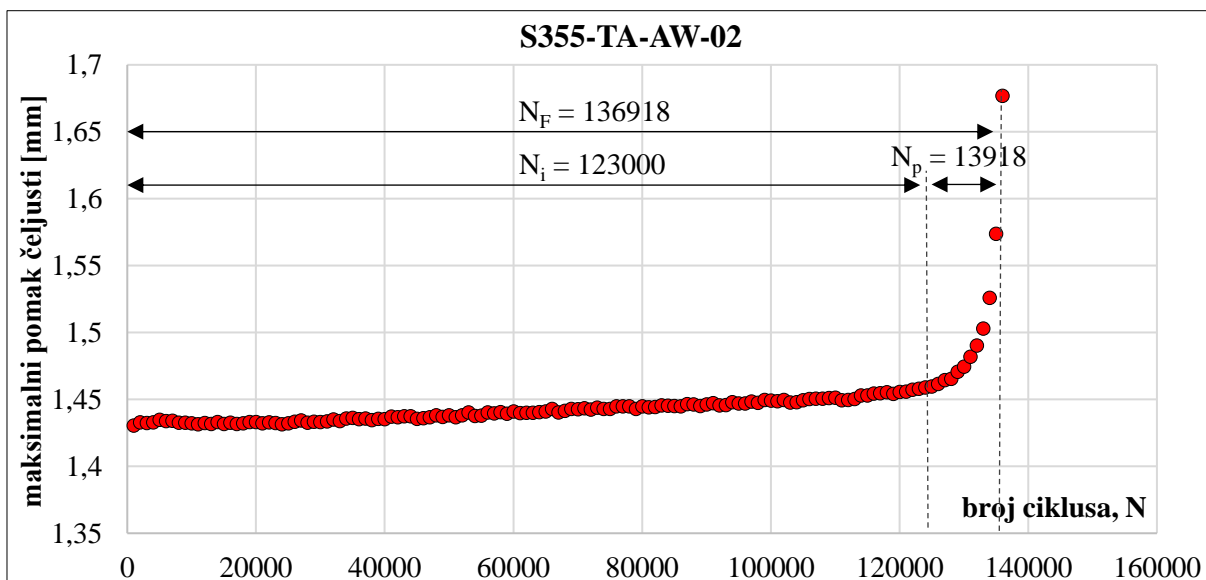
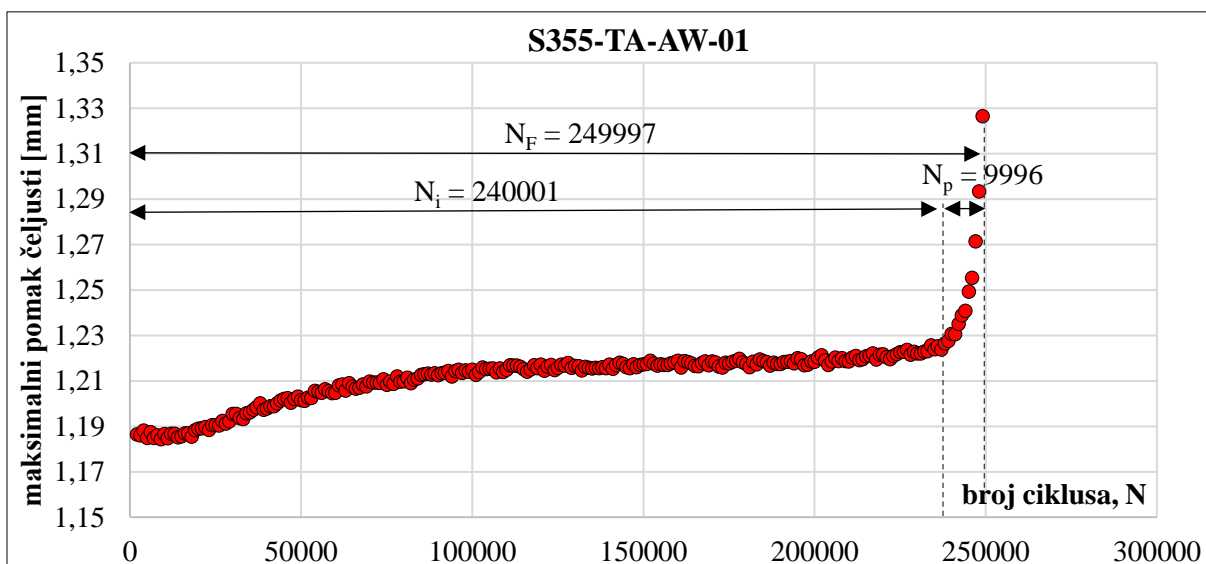
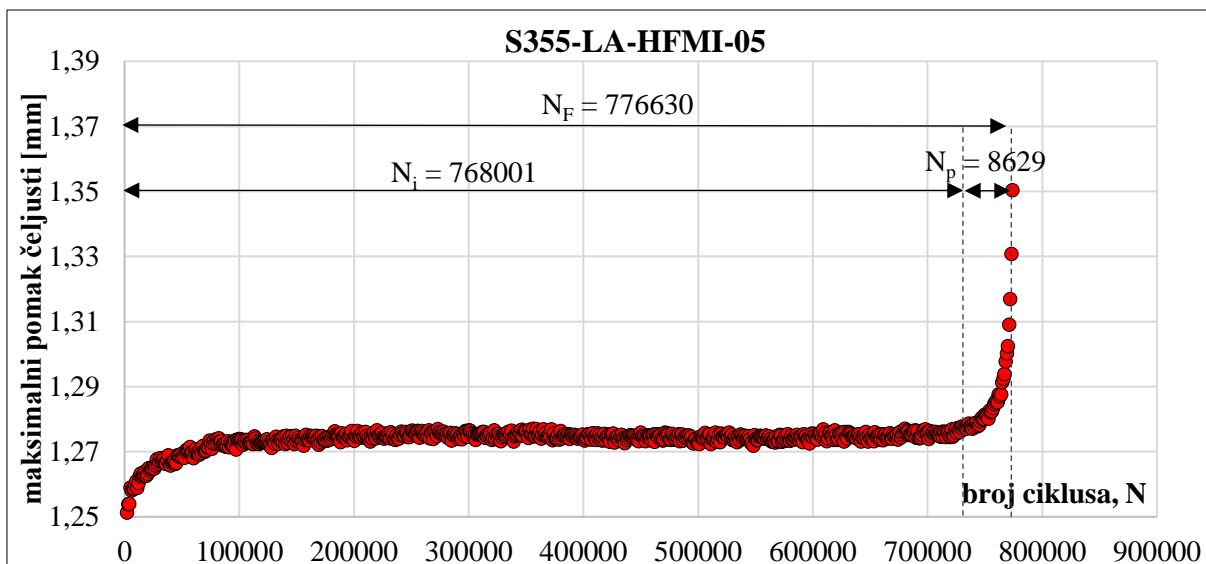
Tablica 6. Geometrijski parametri za detalj S355-TA-HFMI-03

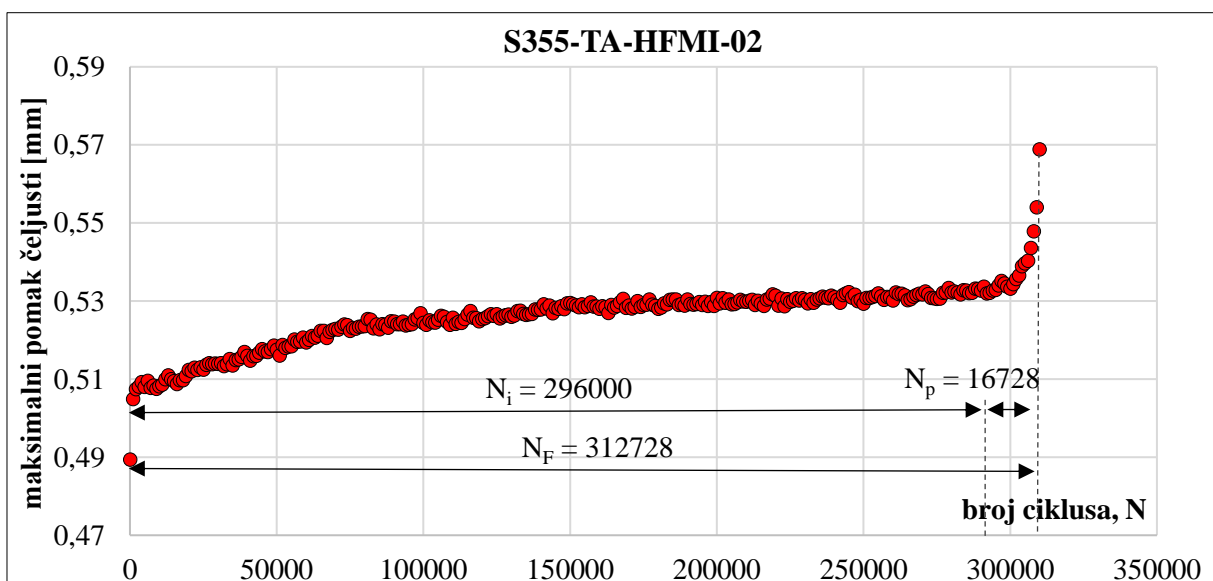
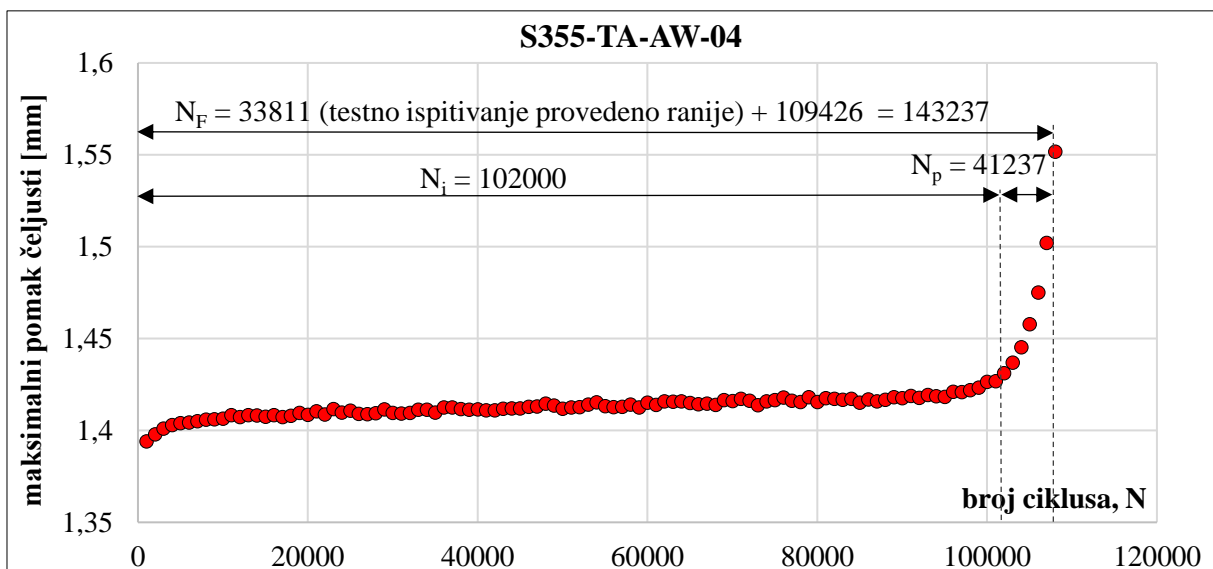
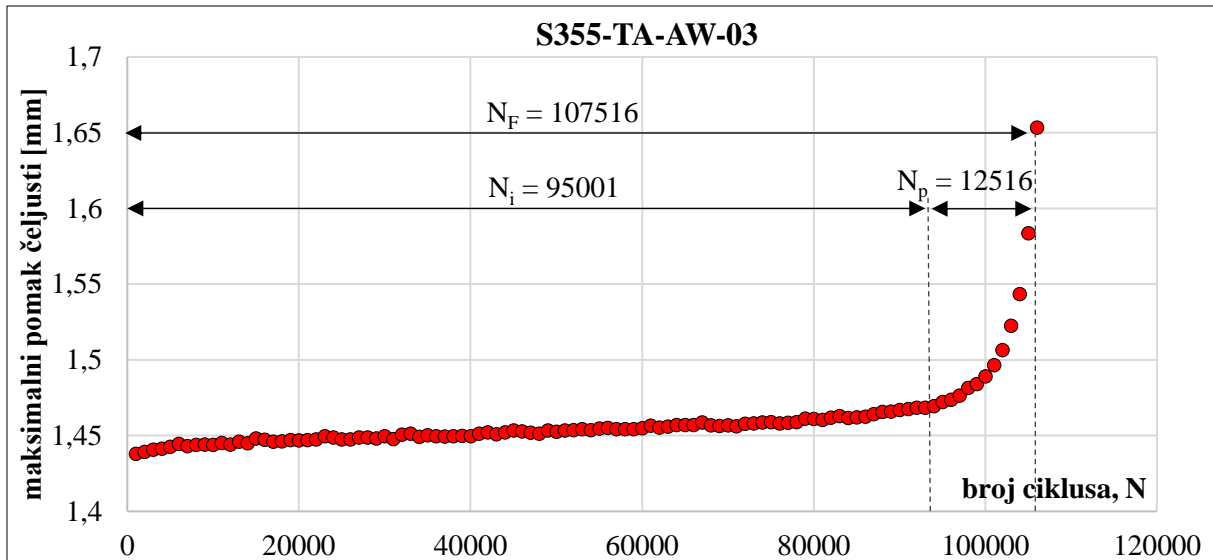
Presjek/ravnina	D _{1,L} [mm]	D _{1,D} [mm]	D _{2,L} [mm]	D _{2,D} [mm]	W _L [mm]	W _D [mm]	R _L [mm]	R _D [mm]
Y +12,00 mm	0,51	0,55	0,78	0,28	3,82	3,99	2,33	2,51
Y +0,00 mm	0,41	0,46	0,49	0,11	4,16	3,97	2,20	2,41
Y -12,00 mm	0,56	0,51	0,21	0,14	4,15	3,81	2,65	2,77

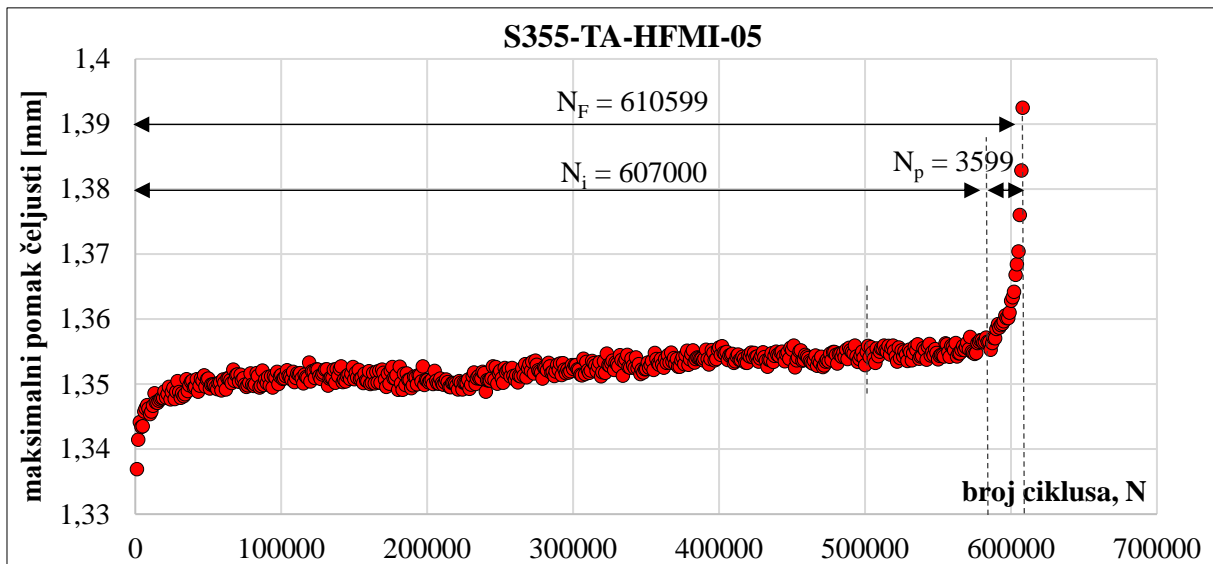
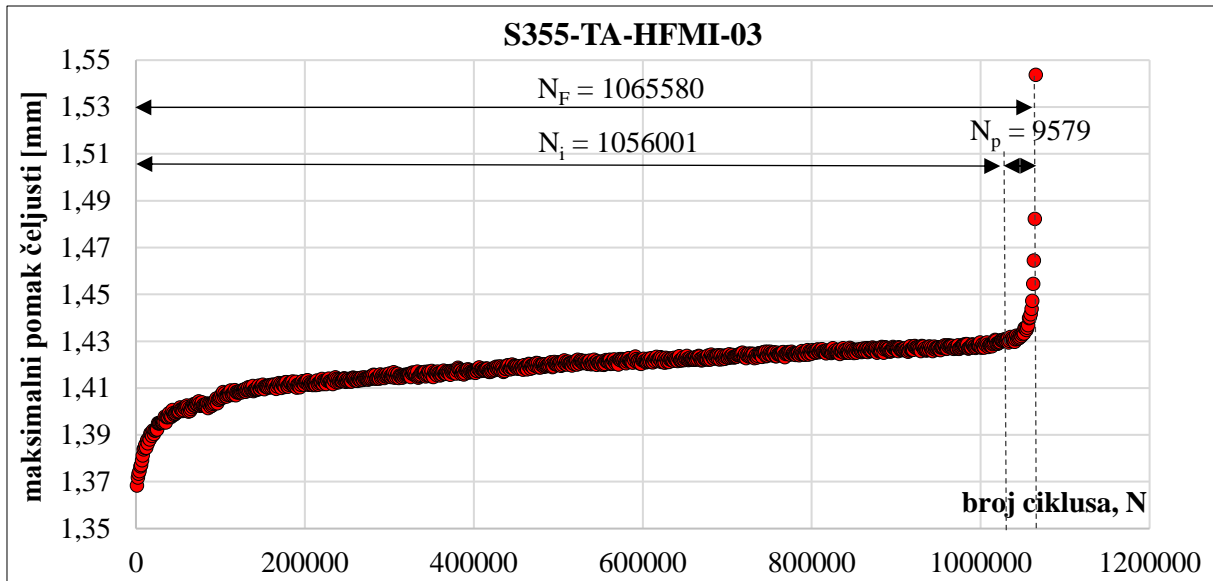
PRILOG C – MAKSIMALNI POMACI ČELJUSTI PREŠE











ŽIVOTOPIS AUTORA S POPISOM OBJAVLJENIH RADOVA

Boris Fuštar rođen je 1990. godine u Slavonskom Brodu, gdje završava osnovnu školu i Prirodoslovno-matematičku gimnaziju „Matija Mesić“ 2009. godine. Nakon srednjoškolskog obrazovanja upisuje sveučilišni preddiplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku kojeg završava 2012. godine. Na istom fakultetu 2014. stječe diplomu na smjeru Nosive konstrukcije sveučilišnog diplomskog studija. Godine 2014. paralelno upisuje diplomski studij na istom fakultetu na smjeru Hidrotehnika, iz kojeg stječe diplomu 2015. godine. Godine 2014. upisuje sveučilišni poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na smjeru Inženjerske konstrukcije. Od listopada 2015. godine do lipnja 2019. godine zaposlen je u tvrtki Projektni biro P45 d.o.o. kao suradnik na izradi projekata cesta, vanjske i unutarnje oborinske odvodnje te inženjerskih konstrukcija poput mostova, propusta, potpornih zidova itd. U prosincu 2017. godine polaže stručni ispit za poslove sudionika u gradnji te se upisuje u Imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva. U studenom 2018. godine polaže stručni ispit za koordinatora zaštite na radu u fazi izrade projekta i građenja. Od srpnja 2019. je zaposlen u Institutu IGH d.d. kao projektant, gdje radi na izradi projektne dokumentacije inženjerskih konstrukcija. Od ožujka do listopada 2022. je zaposlen u Središnjoj agenciji za financiranje i ugovaranje programa i projekata europske unije (SAFU), kao viši stručni savjetnik u službi za građevinske i infrastrukturne radove. Od listopada 2022. zaposlen je u tvrtki ELEA IC d.o.o. kao projektant inženjerskih konstrukcija.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA:

1. B. Fuštar; I. Lukačević; D. Skejić; M. Gašparović, Fatigue tests of as-welded and HFMI treated S355 details with longitudinal and transverse attachments // *Welding in the World*, 66 (2022), 12; 2549-2561 doi:10.1007/s40194-022-01357-7 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni).
2. B. Fuštar; I. Lukačević, D. Skejić, M. Lukić, Two-Stage model for Fatigue Assessment of High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treated Welded Steel Details// *Metals*, 11 (2021), 8; 1-16, doi:10.3390/met11081318 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni).
3. B. Fuštar; I. Lukačević, D. Dujmović, Obrada zavarenih priključaka metodom mehaničkog udara visokom frekvencijom// *Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*, 72 (2020), 5; 421-436 doi:10.14256/JCE.2822.2019 (međunarodna recenzija, pregledni rad, znanstveni).

4. B. Fuštar, I. Lukačević, D. Dujmović, Review of fatigue assessment methods for welded steel structures. // *Advances in Civil Engineering*, 2018 (2018), 3597356, 16 doi:10.1155/2018/3597356 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni).
5. I. Lukačević, B. Fuštar, D. Dujmović, Fatigue life assessment of welded cover plate by using global and local approaches, *ce/papers*, 2017, doi: 10.1002/cepa.546 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
6. B. Fuštar, I. Lukačević, D. Dujmović, Procjena životnoga vijeka zbog umora primjenom lokalnog pristupa Hot Spot, *Zajednički temelji '17.*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2017. str. 211- 217, doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.31
7. B. Fuštar, D. Dujmović, Fatigue prone details in orthotropic steel decks, 1. Simpozij doktorskog studija građevinarstva / Stjepan Lakušić (ur.), Zagreb, 2015.