
**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

Lazar D. Jeremić

**PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH
KONSTRUKCIJA PROJEKTOVANIH SA
SMANJENIM STEPENOM SIGURNOSTI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, Decembar 2020.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Lazar D. Jeremić

**INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED
STRUCTURES DESIGNED WITH REDUCED
SAFETY**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, Decembar 2020.

Mentor:

Dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor
Mašinski fakultet, Beograd

Članovi komisije:

Dr Zoran Radaković, redovni profesor
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Olivera Popović, redovni profesor
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Nebojša Gnjatović, docent
Mašinski fakultet, Beograd

Dr Sedmak Simon, naučni saradnik
Inovacioni centar Mašinski fakultet, Beograd

Datum odbrane: 17.12.2020.

PREDGOVOR

Ova doktorska disertacija je nastala nakon višegodišnjeg istraživanja na projektima tehnološkog razvoja (projekt:TR 35040) finansiranim od strane Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr Aleksandru Sedmaku, na neizmernoj pomoći i savetima tokom izrade disertacije.

Neizmerno se zahvaljujem članovima komisije prof dr Oliveri Popović, dr Nebojša Gnjatović i prof dr Zoranu Radakoviću na pomoći i sugestijama tokom izrade doktorske disertacije vezanih za samu tehnologiju zavarivanja osnovnog materijala i proračuna čvrstoće cevovoda.

Zahvaljujem se kolegi dr Marku Jariću oko izrade osmog poglavlja vezanog za procenu rizika integriteta napojnog cevovoda.

Zahvaljujem dr Blagoju Petrovskom, na savetima oko tumačenja eksperimenta i pripreme poglavlja 6, Simonu Sedmaku i Mihajilu Arandjeloviću na pomoći sa numeričkom simulacijom i kolegama Branislavu Đorđeviću i Nikoli Milovanoviću oko sugestija za izradu doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost svojoj porodici na neizmernoj podršci svih ovih godina.

Bezuslovno sam zahvalan mojoj devojci Ani na neizmernoj podršci svih ovih godina.

PROCENA INTEGRITET ZAVARENIH KONSTRUKCIJA PROJEKTOVANIH SA SMANJENIM STEPENOM SIGURNOSTI

REZIME

Predmet ove doktorske disertacije je istraživanje ponašanja zavarenih konstrukcija sa smanjenim stepenom sigurnosti prema krtom lomu i otpornost na prsline u cilju ocene njenog integriteta i veka. U tom slučaju posebna pažnja se posvećuje mestima koncentracije napona, jer se krti lomovi ovih konstrukcija po pravilu događaju upravo na takvim mestima. Radi detaljnog proučavanja nastanka i rasta prsline, neophodna je primena principa mehanike loma, jer klasični pristup konstruisanju (projektovanju) preko faktora koncentracije napona i čvrstoće u tom slučaju nije dovoljan. Primenom parametra mehanike loma, kao što je faktor intenziteta napona, čiji opseg definiše brzinu rasta prsline, a čija kritična veličina (žilavost loma) određuje kritičnu dužinu prsline. Time se obezbeđuje pouzdana procena integriteta konstrukcije (ako se dokaže da je faktor intenziteta napona manji od žilavosti loma), odnosno procena veka konstrukcije (primenom zakona mehanike loma na izračunavanje kritičnih parametara za poznatu ili pretpostavljenu početnu dužinu prsline, njenu kritičnu vrednost, kao i izračunati opseg faktora intenziteta napona). Konzervativni pristup u svim koracima ove procedure obezbeđuje pouzdanu eksploataciju konstrukcije sa smanjenim stepenom sigurnosti.

KLJUČNE REČI

Integritet, zavarena konstrukcija, cevovod, čelik povišene čvrstoće SM80P, mehanika loma.

Naučna oblast: Tehničke nauke – Mašinsko inženjerstvo.

Uža naučna oblast: Tehnologija materijala.

ASSESSMENT OF THE INTEGRITY OF WELDED CONSTRUCTIONS DESIGNED WITH REDUCED SAFETY LEVEL

ABSTRACT

The subject of this doctoral dissertation is the research of the behavior of welded structures with a reduced degree of safety on brittle fracture and crack resistance in order to assess its integrity and age. In this case, special attention is paid to the stress concentration points, since the fractures of these structures tend to occur exactly in such places. For the detailed study of the crack and growth of the crack, it is necessary to apply the principle of fracture mechanics, since the classical approach to design (design) through the factor of stress concentration and strength is not sufficient in that case. Using the fracture mechanics parameter, such as the voltage intensity factor, whose range defines the rate of crack growth, and whose critical size (fracture toughness) determines the critical crack length. This ensures a reliable assessment of the integrity of the structure (if it is proven that the stress intensity factor is less than the tensile strength of the fracture), or the assessment of the century of construction (by applying laws of fracture mechanics to calculate critical parameters for known or assumed initial crack length, its critical value, as well as calculate the range voltage intensities factor). A conservative approach in all steps of this procedure ensures reliable exploitation of a structure with a reduced degree of safety.

KEYWORDS

Integrity, welded construction, pentock, steel of high strength SM80P, fracture mechanics.

Scientific Field: Technical Sciences – Mechanical Engineering.

Subfield: Materials science.

SADRŽAJ

1.1	UVOD	1
2.	PREGLED LITERATURE	5
2.2.1	Integritet napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“	5
2.2.2	Numeričke simulacije prototipa cevovoda HE „Bajina Bašta“	5
3.	OSOBI NE I PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA	14
3.1.	ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE	14
3.2.	PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE TOKOM ZAVARIVANJA	17
4.	MEHANIKA LOMA I INTEGRITET ZAVARENIH SPOJEVA	20
4.1.	OTVARANJE VRHA PRSLINE (CTOD)	20
4.2.	J INTEGRAL	21
4.3.	EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA	21
4.4.	PROCENA INTEGRITETA KONSTRUKCIJE	22
4.5.	PRIMENA MEHANIKE LOMA NA ZAVARENIM SPOJEVIMA	24
5.	NAPOJNI CEVOVOD HIDROELEKTRANE “BAJINA BAŠTA“	26
5.1	OPIS POSTROJENJA	26
5.2	TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA CEVOVODA	27
5.2.1	Osnovni i dodatni materijal napojnog cevovoda	28
5.2.2	Sušenje dodatnih materijala i temperatura predgrevanja	29
5.2.3	Unos toplote i parametri zavarivanja	31
5.3	PRORAČUN DEBLJINE ZIDA CEVOVODA NA DEJSTVO STATIČKOG PRITISKA	33
6.	EKSPERIMENTALNI DEO	36
6.1	OPIS ISPITANOG PROTOTIPA	36
6.2.	ISPITIVANJE PROTOTIPA	38
6.3.	ANALIZA DEFORMACIJA I NAPONA NA PROTOTIPU	40
6.3.1.	Formule za homogeni oblik suda	40
6.3.2.	Izmerene deformacije prototipa pomoću mernih traka	42
6.3.3.	Analiza napona zavarenih spojeva prototipa	48
6.3.4	Postupak za analizu napona u području prelaza iz elastičnog u plastično ponašanje	49
6.3.5	Promena uporednog napona sa deformacijom u oblasti plastičnih deformacija	50
6.3.6.	Analiza napona pri rasterećenju prototipa	52
6.4	RASPODELA NAPONA I DEFORMACIJA U OSNOVNOM MATERIJALU PROTOTIPA	52
6.6	MEHANIČKA ISPITIVANJA ISEČENIH EPRUVETA	61
7.	NUMERIČKA SIMULACIJA PROTOTIPA CEVOVODA HE „BAJINA BAŠTA“	66

8. OCENA RIZIKA NA OSNOVU INTEGRITETA NAPOJNOG CEVOVODA.....	76
8.1 Dijagram analize loma	77
9. DISKUSIJA REZULTATA.....	81
10. ZAKLJUČAK	83
11. LITERATURA	86
Prilog 1.....	92
Prilog 2.....	93
Prilog 3.....	94

LISTA SKRAĆENICA I OZNAKA

a - dužina prsline

δ – otvaranje vrha prsline (CTOD)

CTOD – otvaranje vrha prsline

CMOD – otvaranje usta prsline

c- dubina prsline

C_E – ugljenični ekvivalent

DM – dodatni materijal

EPP (SAW) - zavarivanje pod praškom

E (MAW) – ručno elektrolučno zavarivanje

EPML – elastoplastična mehanika loma

E – energija

F– sila

FZ – finoizrna oblast

GZ – gruboizrna oblast

HSLA - čelik povišene čvrstoće

IBR (NDT) – ispitivanje metodama bez razaranja

J-integral- Rajsov konturni integral

K- faktor intenziteta napona

LS – linija stapanja

MT – merne trake

MŠ – metal šava

MAG- elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti aktivnog gasa

MKE– metoda konačnih elemenata

OM – osnovni materijal

RHBB- Reverzibilna hidroelektrana Bajina Bašta

RSN – ravno stanje napona

RSD – ravno stanje deformacije

SRP,CDF – sila rasta prsline

TIG- elektrolučno zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa

ZUT – zona uticaja toplote

ZS-zavereni spoj

Q, q – količina energije unete pri zavarivanju

SPISAK SLIKA

Slika 1.1 Sudovi debelih zidova izloženi unutrašnjem i spoljašnjem pritisku

Slika 1.2. Naponsko stanje kod tankozidnih sudova (radijalni naponi su jednaki nuli)

Slika 2.1 Model prototipa cevovoda odrađen u programu Abaqus

Slika 2.2 Mreža konačnih elemenata na modelu cevovoda

Slika 2.3 Granični uslovi na modelu cevovoda

Slika 2.4 Raspodela von Mizesovog napona pri primeni metoda konačnih elemenata pri prvom naprežanju ($P = 12,3 \text{ MPa}$)

Slika 2.5 Plastična deformacija dobijena primenom metode konačnih elemenata ($P = 12,3 \text{ MPa}$)

Slika 2.6. Raspodela fon Mizesovog napona - MKE model za opterećenje ($P = 10,7 \text{ MPa}$)

Slika 2.7 Plastična deformacija MS1 SAW ($P = 10,7 \text{ MPa}$)

Slika 2.8 Unutrašnji pritisak von Mizesove deformacije za zavareni spoj LS1 SAW

Slika 2.9 Dijagram zavisnosti obimnog napona deformacije za zavareni spoj WM LS1 SAW

Slika 2.10 Dijagram fon Mizesov napon-deformacija za zavareni spoj LS1 SAW sa zaostalim plastičnim deformacijama

Slika 2.11 Položaj trake 34 na prototipu cevovoda HE Bajina Bašta

Slika 2.12 Ravan model zavarenog spoja sa mrežom konačnih elemenata u Abaqusu

Slika 2.13 Zakrivljen model zavarenog spoja sa mrežom konačnih elemenata u Abaqusu

Slika 2.14 Raspodela napona na ravnom modelu

Slika 2.15 Plastične deformacije na ravnom modelu

Slika 2.16 Raspodela napona na zakrivljenom modelu

Slika 2.17 Plastične deformacije na zakrivljenom modelu

Slika 3.1. Vrednosti difundovanog vodonika u metalu šava i čistom šavu (formiranom samo od dodatnog materijala), za različite postupke zavarivanja

Slika 3.2. Maksimalna temperatura predgrevanja pri zavarivanju konstrukcijskih mikrolegiranih čelika

Slika 3.3 Koeficijent difuzije vodonika feritnih i austenitnih čelika u zavisnosti od temperature

Slika 3.4. Uticaj temperature predgrevanja na sklonost ka obrazovanju prslina

Slika 4.1. Modeli otvaranja prsline: a) Irvinov, b) Dagdejlov (model trake popuštanja)

Slika 4.2. Definicije CTOD: a) rastojanje lica na mestu vrha prsline, b) presek sa otvorom 90°

Slika 4.3. Sile rasta prsline (parametarski zavisne od napona σ) vs. J-R kriva

Slika 4.4. Prikaz postupka određivanja CTOD za prslinu na liniji stapanja

Slika 4.5. Presek kroz ZUT niskolegiranog čelika povišene čvrstoće

Slika 4.6. Način vađenja epruveta i položaj prsline pri ispitivanju metala šava

Slika 5.1. Gornja i donja akumulacija i dovodno-odvodni sistem hidroelektrane "Bajina Bašta"

Slika 5.2. Dispozicija gornjeg i donjeg cevovoda "Bajina Bašta"

Slika 5.3. Presek cevovoda sa karakteristikama poprečnog preseka

Slika. 6.1 Konstrukcija i dimenzije prototipa cevovoda

Slika. 6.2. Raspored mernih mesta na razvijenom omotaču prototipa

Slika 6.3. Dijagram promene napona osnovnog metala sa deformacijom

Slika 6.4 Zavisnost napona od ukupne deformacije (Merne trake 34 i 3)

Slika 6.5 Zavisnost napona od ukupne deformacije

Slika 6.6 Zavisnost napona od ukupne deformacije

Slika 6.7. Plan izrade epruveta sa pridruženih proba

Slika 6.8. Plan izrade epruveta sa omotača prototipa

Slika 7.1 Model i granični uslovi prototipa cevovoda odrađen u programu ABAQUS

Slika 7.2 Mreža konačnih elemenata prototipa cevovoda odrađen u programu ABAQUS

Slika 7.3 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LS4 za pritisak od 12,05MPa

Slika 7.4 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LS4 za pritisak od 12,05MPa

Slika 7.5 Zaostale plastične deformacije za spoj LS4 za pritisak od 12,05 MPa

Slika 7.6 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LM2 za pritisak od 12,05

Slika 7.7 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LM2 za pritisak od 12,05MPa

Slika 7.8 Zaostale plastične deformacije za spoj LM2 za pritisak od 12,05MPa

Slika 7.9 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LS4 za pritisak od 9,02MPa

Slika 7.10 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LS4 za pritisak od 9,02MPa

Slika 7.11 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LM2 za pritisak od 9,02MPa

Slika 7.12 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LM2 za pritisak od 9,02MPa

Slika 7.13 Zaostale plastične deformacije za spojeve LS4 i LM2 za pritisak od 9,02MPa

Slika 7.14 Ekvivalentna raspodela plastičnog naprezanja za numerički model sa OM SM60P

Slika 7.15 Ekvivalentna raspodela plastičnog naprezanja za numerički model sa OM SM60P u kružnim zavarenim spojevima

Slika 9.1. Dijagram Analize Loma

Slika 9.2. Dijagrama Analize Loma za napojni cevovod RHBB

SPISAK TABELA

Tabela 5.1. Hemijski sastav čelika SM80P izražen u težinskim procentima (podaci proizvođača)

Tabela 5.2. Tipični hemijski sastav žice US-80B u težinskim procentima (podaci proizvođača)

Tabela 5.3. Tipične mehaničke karakteristike čistog šava ostvarenog žicom US-80B i praškom MF-38B

Tabela 5.4. Temperatura predgrevanja zavarenih spojeva i heftova

Tabela 5.5 Unos toplote kod zavarivanja suočenih spojeva

Tabela 5.6 Parametri kod ručnog električnog zavarivanja suočenih spojeva

Tabela 5.7 Parametri kod EPP zavarivanja suočenih spojeva

Tabela 5.8 Ulazni podaci za proračun cevovoda

Tabela 5.9 Proračunska debljina zida cevovoda

Tabela 6.1. Hemijski sastav i mehaničke osobine limova i dodatnog metala

Tabela 6.2. Plan opterećivanja prototipa i merenja deformacija u toku hidrostatičkog ispitivanja

Tabela 6.3 Raspodela deformacija i napona na spoljnoj površini idealnog prototipa

Tabela 6.4. Izmerene deformacije osnovnog metala u obimnom pravcu $\epsilon_t 10^{-6}$

Tabela 6.5. Izmerene obimne deformacije $\epsilon_t 10^{-6}$ na šavovima prototipa

Tabela 6.5. Nastavak 1

Tabela 6.5. Nastavak 2

Tabele 6.6. Izmerene deformacije u aksijalnom pravcu ϵ_z , $\mu\text{m/m}$ na šavovima prototipa

Tabela 6.7. Raspodela deformacija i napona osnovnog metala prototipa (merna traka 53)

Tabela 6.8. Parametri nelinearne promene napona sa deformacijom za šavove prototipa

Tabela 6.9. Raspodela deformacija i napona metala šava LS1 prototipa (merne trake 34 i 3)

Tabela 6.10. Raspodela napona i deformacija šava LS4 (merne trake 27 i 23)

Tabela 6.11. Raspodela napona i deformacija šava LM2 (merne trake 25 i 24)

Tabela 6.12. Rezultati ispitivanja zatezanjem epruveta zavarenih spojeva

Tabela 6.13. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika dodatnog metala

Tabela 6.14. Promena tvrdoće kroz zavarene spojeve

Tabela 6.15. Prosečne vrednosti udarne žilavosti pri različitim temperaturama ispitivanja na Šarpi klatnu

Tabela 6.16 Mehaničke karakteristike ispitanih uzoraka

Tabela 8.1. Mehaničke karakteristike za numeričku simulaciju

Tabela 10.1. Opisana matrica rizika

Table 10.2. Matrica rizika za $\frac{1}{4}$ prsline i $\frac{1}{2}$ prsline, $p=9,02$ MPa and $12,05$ MPa

1.1 UVOD

Posude pod pritiskom su mašinski elementi najčešće kružno-cilindričnog oblika, prstenastog poprečnog preseka /1.1/, koji se koriste kao:

- cevi za sprovođenje gasova, tečnosti i rastresitog ili zrnastog materijala,
- cevi u naoružanju,
- rezervoari (za tečnost, gasove),
- parni kotlovi,
- sudovi u procesnoj industriji,
- cilindri klipnih mašina,
- delovi čvrstih naleganja.

Razlikuju se sudovi izloženi unutrašnjem pritisku i izloženi spoljašnjem pritisku.

U pogledu proračuna čvrstoće razlikuju se:

- a) Sudovi debelih zidova izloženi unutrašnjem i spoljašnjem pritisku, r_u i r_s , slika 1, za koje važi uslov:

$$\frac{d_u}{d_s} = \psi < 0,9 ; \frac{\delta}{d_u} > 0,07 \quad (1.1)$$

- b) Sudovi tankih zidova izloženi unutrašnjem i spoljašnjem pritisku, r_u i r_s , slika 2, za koje važi uslov:

$$\frac{d_u}{d_s} = \psi \geq 0,9 ; \frac{\delta}{d_u} \leq 0,07 \quad (1.2)$$

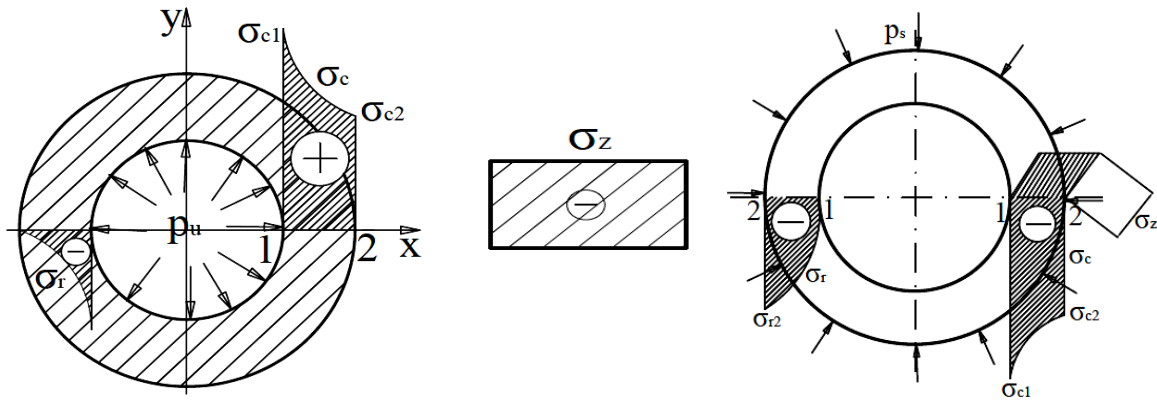
Naponi u posudama pod pritiskom:

σ_c → cirkularni naponi (u pravcu tangente)

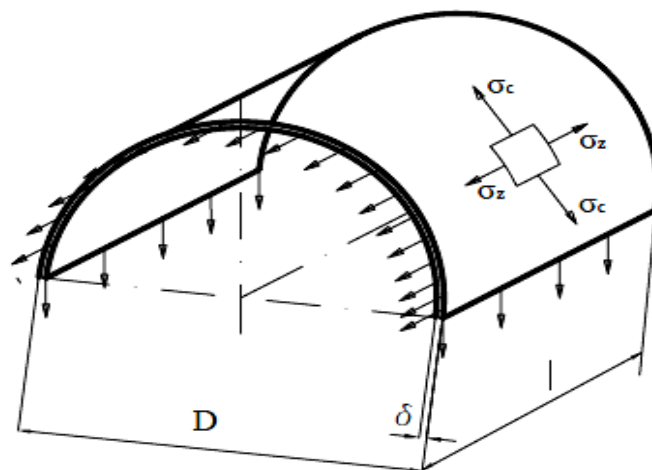
σ_z → aksijalni naponi (u pravcu ose suda)

σ_r → radijalni naponi (u radijalnom pravcu).

Raspored napona kod opreme pod pritiskom tj. dijagrami napona prikazani su na slici 1.1.



Slika 1.1 Sudovi debelih zidova izloženi unutrašnjem i spoljašnjem pritisku /1.1/



Slika 1.2. Naponsko stanje kod tankozidnih sudova (radijalni naponi su jednaki nuli) /1.1/

Deformacije koje izazivaju naponi:

- aksijalni naponi teže da povećaju dužinu suda,
- radijalni naponi deluju da povećaju unutrašnji prečnik,
- cirkularni naponi deluju da povećaju i unutrašnji i spoljašnji prečnik.

Čelici povišene čvrstoće se sve više koriste za izradu zavarenih konstrukcija zbog povišene čvrstoće, dobre žilavosti i zavarljivosti. Ove osobine omogućavaju proizvodnju lakših i pouzdanijih konstrukcija zbog čega su ovi čelici našli široku primenu u proizvodnji cevovoda, posuda pod pritiskom. Finozrni čelici imaju visoku čvrstoću, relativno dobru žilavost, uobičajenu korozionu otpornost i relativno nisku cenu.. Na primer, HSLA čelici se koriste za izradu cevovoda i posuda pod pritiskom.

Kao što se pojavljuju i u ostalim vrstama zavarenih spojeva, prslina se pojavljuju i čelicima povišene čvrstoće. Literaturni podaci o čelicima povišene čvrstoće se uglavnom odnose na podatke iz tehnologije zavarivanja i nema mnogo podataka o nastanku i rastu prslina u njima. Greške u spojevima od ove grupe čelika mogu da dovedu do otkaza i havarija zavarenih konstrukcija.

Međutim, kako literaturni podaci pokazuju, trenutna saznanja o njihovom ponašanju u uslovima eksploatacije su nedovoljna.

Predmet ove doktorske disertacije je istraživanje ponašanja zavarenih konstrukcija sa smanjenim stepenom sigurnosti prema krtom lomu i hladnim prslinama u cilju ocene njenog integriteta i veka. U tom slučaju posebna pažnja se posvećuje mestima koncentracije napona, jer se krti lomovi ovih konstrukcija po pravilu događaju upravo na takvim mestima. Radi detaljnog proučavanja nastanka i rasta prsline, neophodna je primena principa mehanike loma, jer klasični pristup konstruisanju (projektovanju) preko faktora koncentracije napona i čvrstoće u tom slučaju nije dovoljan. Primenom parametara mehanike loma, kao što je faktor intenziteta napona, čiji opseg definiše brzinu rasta prsline, a čija kritična veličina (žilavost loma) određuje kritičnu dužinu prsline. Time se obezbeđuje pouzdana procena integriteta konstrukcije (ako se dokaže da je faktor intenziteta napona manji od žilavosti loma), odnosno procena veka konstrukcije (primenom zakona mehanike loma na izračunavanje ključnih parametara za poznatu ili pretpostavljenu početnu dužinu prsline, njenu kritičnu vrednost, kao i izračunati opseg faktora intenziteta napona). Konzervativni pristup u svim koracima ove procedure obezbeđuje pouzdanu eksploataciju konstrukcije sa smanjenim stepenom sigurnosti.

Eksperimentalno istraživanje ove disertacije će sadržati:

- Ispitivanje zavarenih spojeva prototipa cevovoda u cilju određivanja svih potrebnih svojstava materijala kao što su Šarpijeva žilavost, žilavost loma i parametri mehanike loma, kao i prikaz naponsko deformacionog stanja osnovnog materijala i zavarenih spojeva.

Prilikom izrade disertacije biće korišćene: numeričke, analitičke i eksperimentalne metode. Numeričke metode će sadržati:

- Primenu metoda konačnih elemenata na simulaciji ponašanja prototipa napojnog cevovoda hidroelektrane.
- Primena parametra mehanike loma na integritet cevovoda.
- Ocena integriteta cevovoda na osnovu matrice rizika.

Analitičke metode se odnose na primenu izraza koji određuju brzinu rasta prsline tj. zakon mehanike loma i njegove modifikacije.

Koncepcija rada disertacije se može podeliti u pet celina:

- U prvom delu rada biće prikazana i analizirana celokupna problematika ovog rada, uz prikaz odgovarajuće literature
- U drugom delu rada biće prikazano eksperimentalno istraživanje zavarenih spojeva cevovoda hidroelektrane „Bajina bašta“, u okviru koga su određena sva potrebna svojstva materijala kao što su žilavost, žilavost loma i parametri mehanike loma.
- U trećem delu rada biće primenjena metoda konačnih elemenata u cilju određivanja naponskog stanja cevovoda. Posebna pažnja biće posvećena ponašanju materijala u prisustvu

prslina, odnosno određivanja faktora inteziteta napona domena sa pretpostavljenom veličinom prslina. Takođe treba pratiti promenu veličine faktora inteziteta napona sa rastom prslina u datom domenu da bi mogao precizno da se primeni zakon mehanike loma.

- U četvrtom delu će biti urađena detaljna analiza rezultata eksperimentalnog istraživanja i numeričke simulacije ponašanja cevovoda u ekpalacionim uslovima, na osnovu čega će se utvrditi njegovo ponašanje pod dejstvom radnog opterećenja i ocena rizika na osnovu njegovog integriteta.
- U petom delu će biti data diskusija rezultata na osnovu koje će biti izvedeni zaključci o integritetu i veku cevovoda hidroelektrane, odnosno njegovoj spremnosti za upotrebu.

2. PREGLED LITERATURE

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati određenih radova koji su se bavili ovom tematikom, pre svega ekperimentalnog ispitivanja napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“, kao i samog osnovnog materijala SUMITEN SM80P, u kombinaciji sa metodom konačnih elemenata, uključujući radove sa međunarodnih konferencija, iz časopisa, kao i doktorske disertacije. Kroz ove radove će biti objašnjeno kako je došlo do ideje za izbor teme, i kako je sve izgledalo od samog početka. Preciznije, radovi predstavljeni u ovom poglavlju će biti fokusirani na sledeće: Eksperimentalno ispitivanje i numeričku analizu napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ od čelika povišene čvrstoće SM80P, sa posebnim pažnjom na zavarene spojeve i mesta koncentracije napona.

2.2.1 Integritet napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“

Pre nego što se prikažu ekperimentalna ispitivanja koja su do sada rađena na napojnom cevovodu treba napomenuti literaturu koja pokazuje izradu i detalje tehnologije zavarivanja napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ /2.1/. Prikaz celokupne tehnologije zavarivanja biće opisana u poglavlju 4.

Postrojenje RHE “Bajina Bašta” je opisano kroz par radova i monografija koja su se bavila ovom tematikom /2.2-2.4/. Detaljan opis samog postrojenja razmatraće se u poglavlju 5.

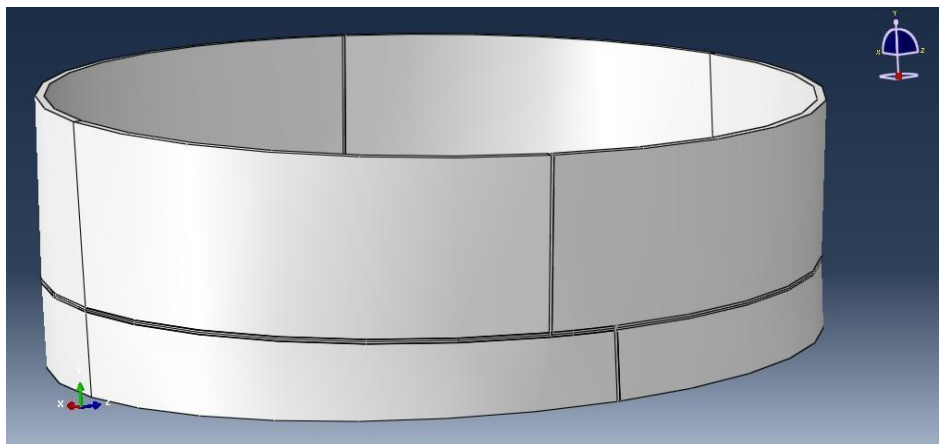
Za svaku procenu integriteta konstrukcija mora da postoje neka ekperimentalna ispitivanja samog postrojenja. Pošto je uvek u realnim uslovima teško ispitati celu konstrukciju uvek se iz toga razloga prave model tj. prototipi na kojima se vrše ispitivanja. Zato su u ovom radu korišćena ispitivanja prototipa napojnog cevovoda HE “Bajina Bašta”, prikazana u poglavlju 6. Ova ekperimentalna ispitivanja su bili ključni podaci za procenu integriteta samog cevovoda, kao i za izradu samog numeričkog modela. Pored ekperimentalnih ispitivanja, radjena su ispitivanja i na rast prsline primenom parametara mehanike loma, koja su bila pokazatelji na otpornost osnovnog materijala SM80P, kao i zavarenih spojeva na rast prsline. /2.3-2.4/.

2.2.2 Numeričke simulacije prototipa cevovoda HE „Bajina Bašta“

Na osnovu navedenih ekperimentalnih rezultata rađena su numerička ispitivanja u zoni najvećih koncentracija napona, a to je oblast oko zavarenog spoja LS1, gde su se javile najveće zaostale plastične deformacije (zona oko merne trake 34). Na osnovu tih analiza odrađene su dve doktorske disertacije i nekoliko naučnih radova /2.3-2.4/. Neke od tih numeričkih rezultata će prikazati u ovom poglavlju. /2.5-2.8/.

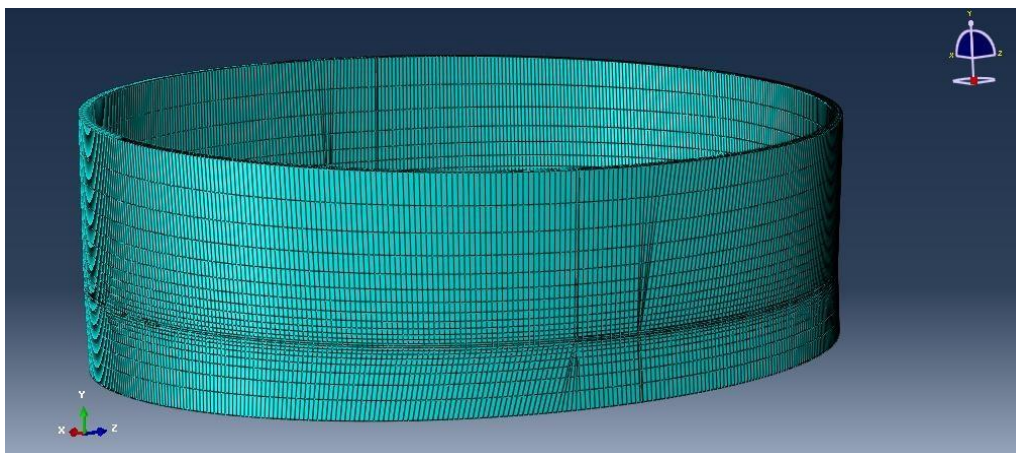
U ovom poglavlju biće prikazan numerički model prototipa cevovoda HE „Bajina Bašta“ u program paketu Abaqus. Pomoću ovog numeričkog modela pokazaćemo naponsko stanje cevovoda pod dejstvom unutrašnjeg pritiska tokom hidrostatičkog ispitivanja.

Na slici 2.1. biće prikazan model protitipa cevovoda odrađen u programu Abaqus, ali biće izostavljen treći segment zato što se može zanemariti za dalju numeričku analizu /2.5-2.7/.



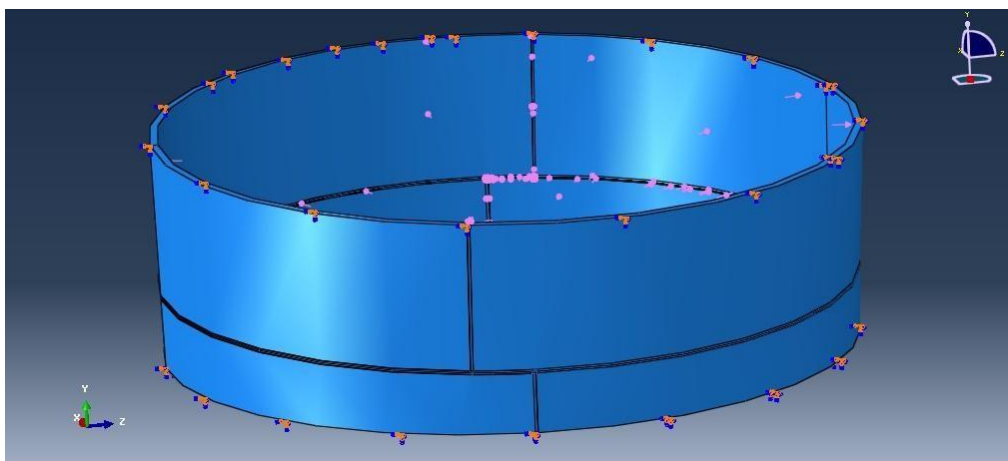
Slika 2.1 Model prototipa cevovoda odrađen u programu Abaqus /2.5-2.7/

Sledeći korak u MKE, modelu cevovoda, jeste postavljanje mreže konačnih elemenata. Jer ako se ne postavi dobra mreža konačnih elemenata onda nećemo dobiti dobre podatke tokom numeričke analize. Na slici 2.2 biće prikazan model prototipa sa mrežom konačnih elemenata /2.5-2.7/.



Slika 2.2 Mreža konačnih elemenata na modelu cevovoda /2.5-2.7/

Grafični uslovi za ispitivanje cevovoda pod pritiskom biće prikazani u radovima na slici 2.3, /2.5-2.7/.



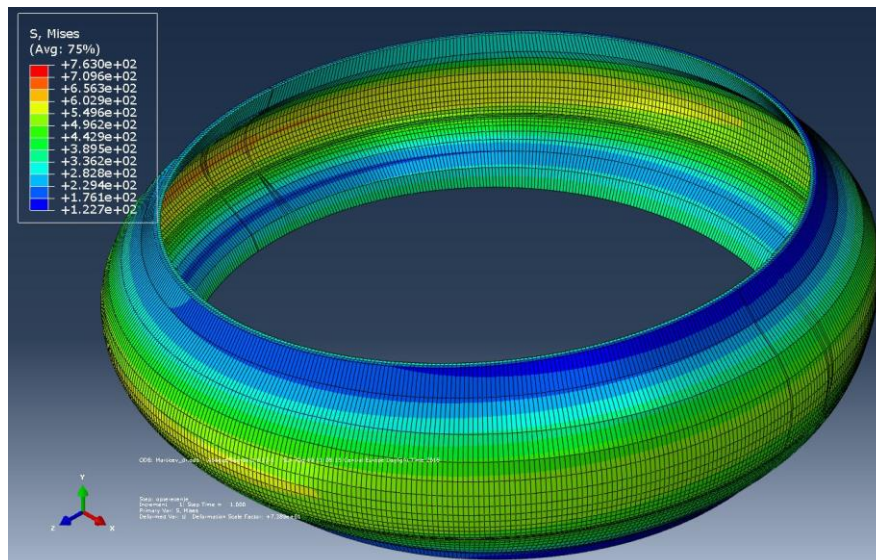
Slika 2.3

Grafični uslovi na modelu cevovoda /2.5-2.7/

Ovaj numericki model biće izložen hidrostatičkom ispitivanju sa različitim vrednostima pritiska. Ali će se najviše pažnje obratiti na deo prototipa, gde menja smer pod uglom od 5° , a to je na mestu kolena, jer je tu najveća koncentracija napona.

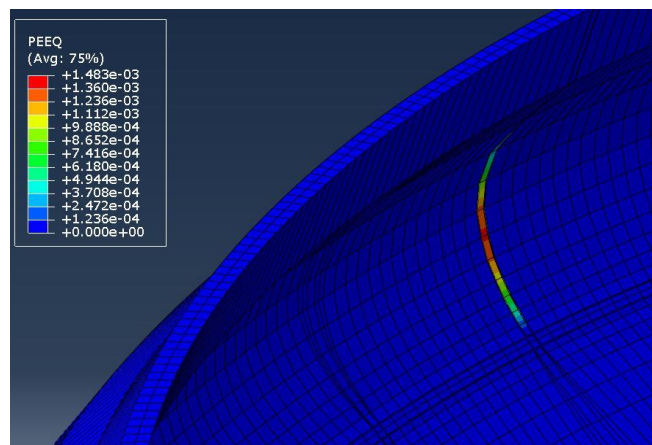
Izgled prototipa, karakteristike materijala, faze hidrostatičkog ispitivanja, kao i raspored mernih traka su objašnjeni u poglavlju 7.1 i 7.2 /2.3-2.5/.

Na sledećim slikama biće prikazana von Misesova raspodela napona na mestu najveće koncentracije napona (na mestu kolena pod uglom od 5°), a to je u ovom slučaju na mestu zavarenog spoja LS1 i to za vrednost pritiska od $P = 12,3 \text{ MPa}$ i $P = 10,7 \text{ MPa}$ /2.5-2.7/. Na slici 2.4 prikazana je von Misesova raspodela napona u prvom opterećenju, dobijena primenom ABAQUS softvera. Maksimalni napon je dobijen na mestu najveće koncentracije napona odnosno na mestu zavarenog spoja (LS1 SAW), kao i u osnovnom metalu u njegovoj okolini.



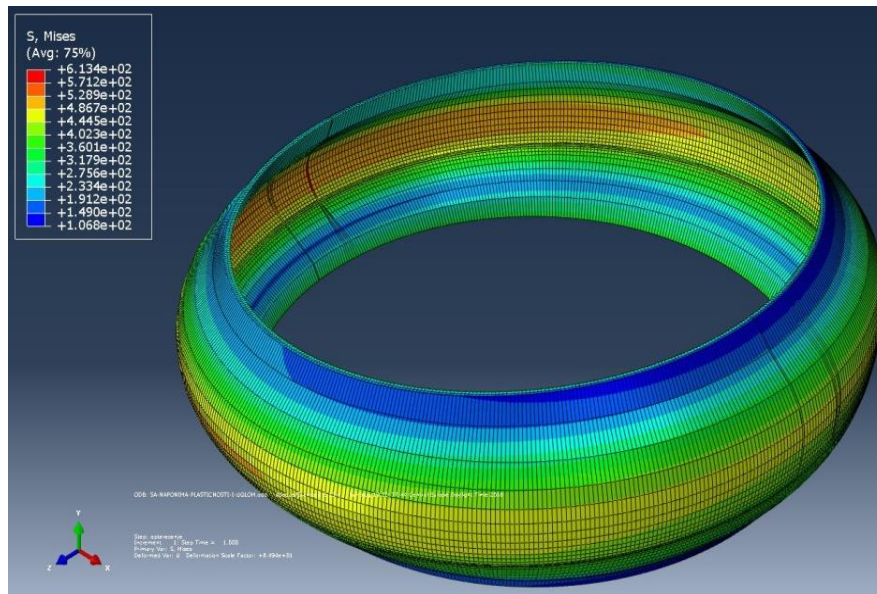
Slika 2.4 Raspodela von Misesovog napona pri primeni metoda konačnih elemenata pri prvom naprezanju ($P = 12,3 \text{ MPa}$) /2.5-2.7/

Kao što se vidi na slici 2.5, plastična deformacija se pojavljuje samo u posmatranom zavarenom spoju (LS1 SAW), što je posledica koncentracije napona i nižeg nivoa napona tečenja.



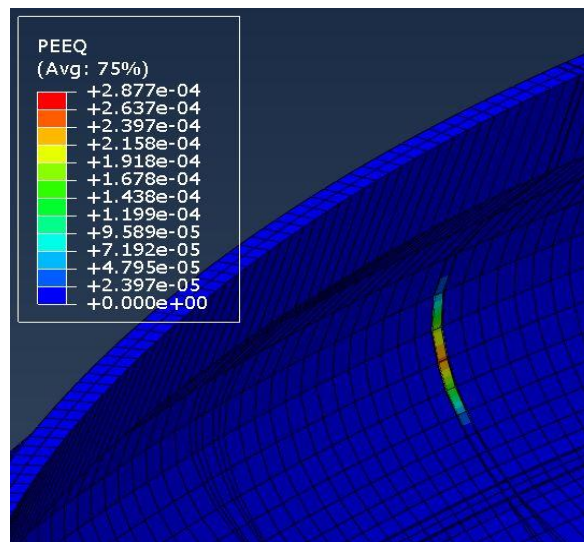
Slika 2.5 Plastična deformacija dobijena primenom metode konačnih elemenata ($P = 12,3 \text{ MPa}$) /2.5-2.7/

Slika 2.6 pokazuje raspodelu Von Mizesovog napona, dobijenog proračunom u ABAQUS-u. Najveći napon je dobijen u metalu šava, na mestu koncentracije napona. Ovako visok nivo napona (724 MPa) je dobijen usled efekta početne plastične deformacije i koncentracije napona /2.5-2.7/



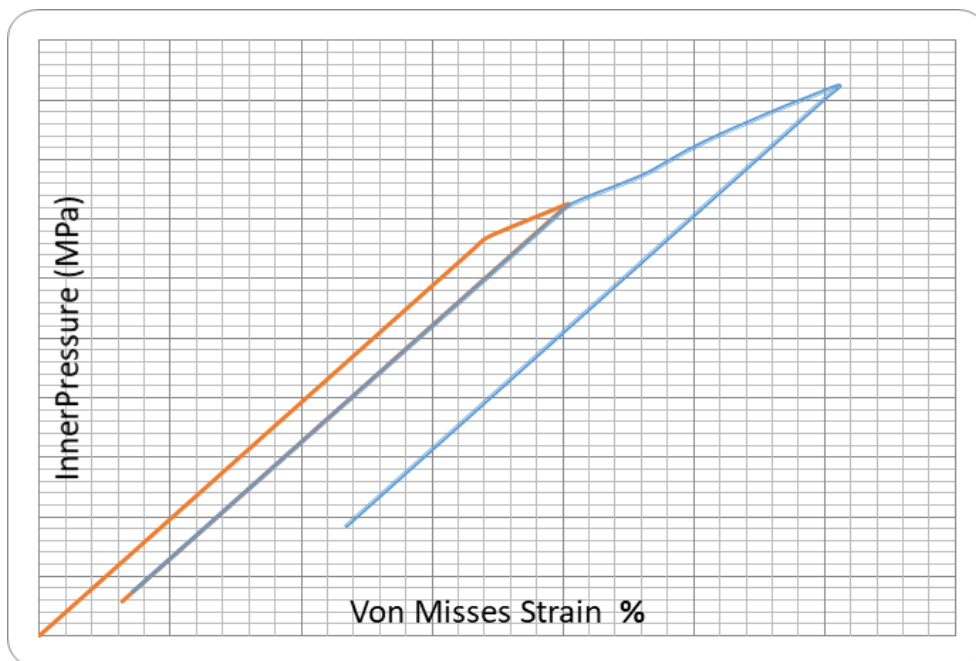
Slika 2.6. Raspodela fon Mizesovog napona - MKE model za opterećenje ($P=10,7$ MPa) /2.5-2.7/

Na slici 2.7 prikazana je raspodela plastične deformacije u zavarenom spoju LS1. Ovakvo ponašanje je uslovljenom nižim nivoom napona tečenja u metalu šava u odnosu na osnovni metal /2.5-2.7/.



Slika 2.7 Plastična deformacija MS1 SAW ($P=10.7$ MPa) /2.5-2.7/

Na slikama 2.8 i 2.9 je ilustrovana zavisnost fon Mizesovog napona i deformacija koje tom prilikom nastaju za zavareni spoj (LS1SAW) u slučaju prvog i drugog ciklusa opterećenje-rasterećenje, dobijene proračunom u ABAQUS softveru. Primetna je nelinearnost ponašanja, odnosno zaostala plastična deformacija na slici 2.10, nivoa 0.3% /2.5-2.7/.

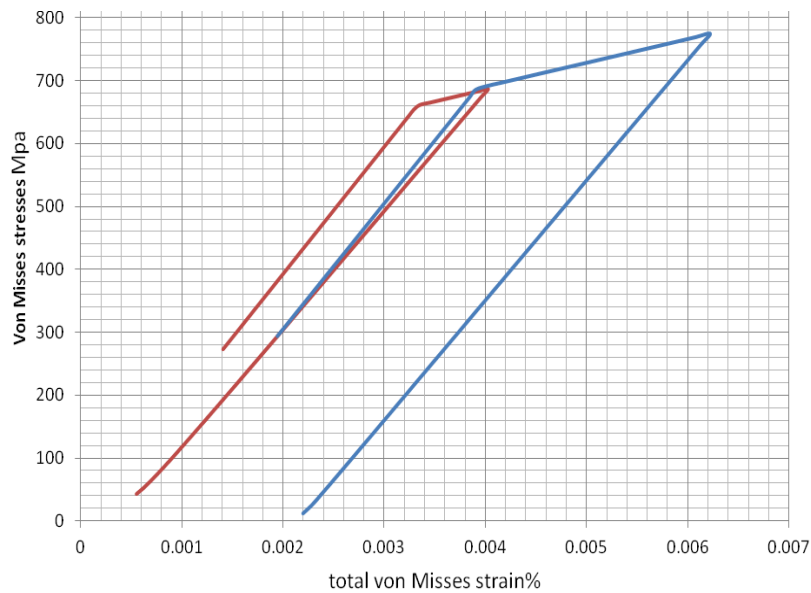


Slika 2.8 Unutrašnji pritisak von Mizesove deformacije za zavareni spoj LS1 SAW/2.5-2.7/



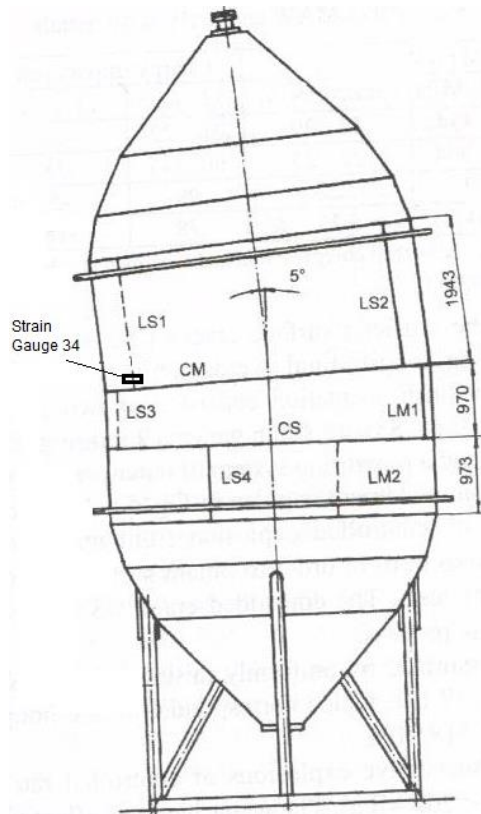
Slika 2.9 Dijagram zavisnosti obimnog napona deformacije za zavareni spoj WM LS1 SAW /2.5-2.7/

Izgled krivih von Mizes napon-deformacija za zavareni spoj LS1 SAW sa zaostalim plastičnim deformacijama je dat slici 2.12.



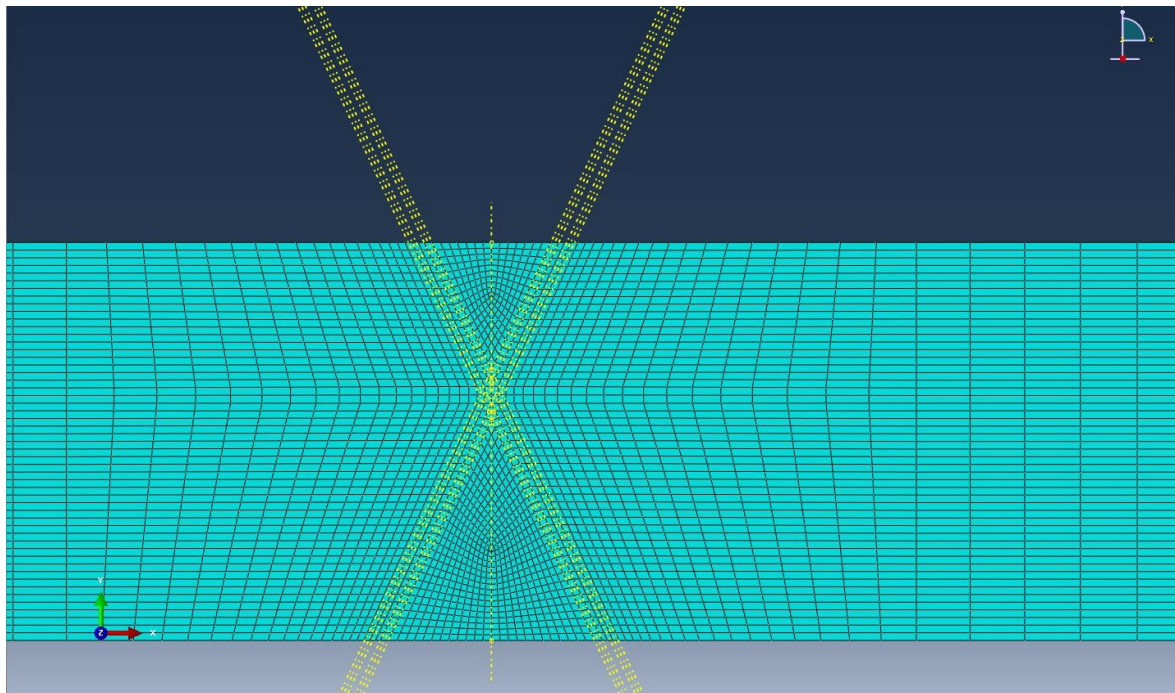
Slika 2.10 Dijagram fon Mizesov napon-deformacija za zavareni spoj LS1 SAW sa zaostalim plastičnim deformacijama /2.5-2.7/

U daljem razmatranju fokus će biti dat na mesto najveće deformacije prototipa, a to se nalazi u oblasti merne trake 34 odmah ispod zavarenog spoja LS1. Na slici 2.11 biće prikazana lokacija merne trake 34 na prototipu. /2.8/

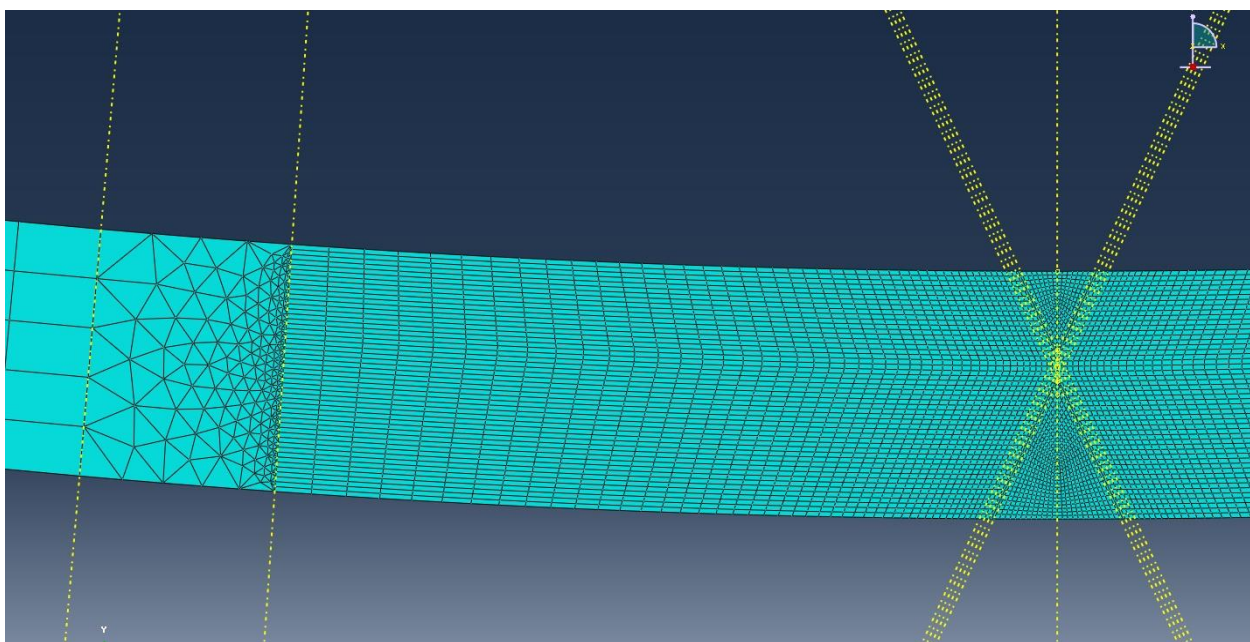


Slika 2.11 Polozaj trake 34 na prototipu cevovoda HE Bajina Bašta /2.8/

Nakon 3D simulacije, napravljeni su 2D modeli zavarenih spojeva u okolini merne trake 34. Napravljena su dva modela, jedan ravan, a drugi sa zakrivljenjem. Cilj ove numeričke simulacije je da se vidi ponašanje samog zavarenog spoja kao celine na mestu najveće deformacije. Na slikama 2.12 i 2.13 je prikazan izgled ova dva modela sa mrezom konačnih elemenata /2.8/.

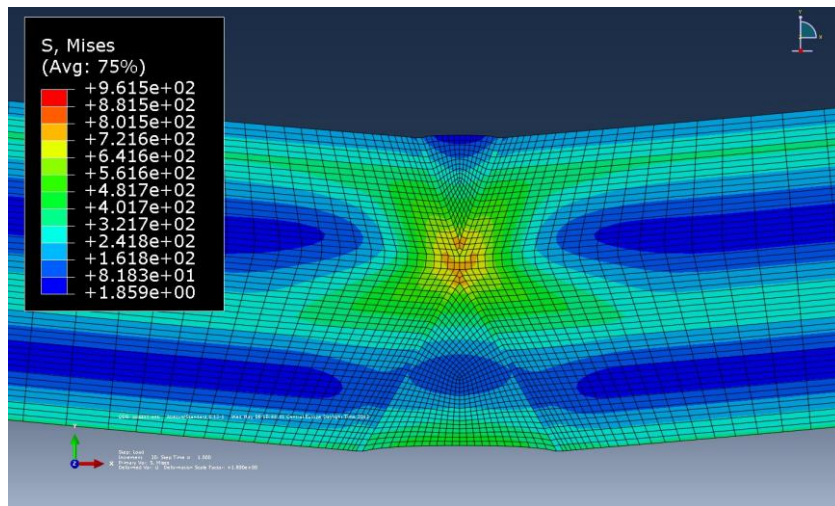


Slika 2.12 Ravan model zavarenog spoja sa mrezom konačnih elemenata u Abaqusu /2.8/

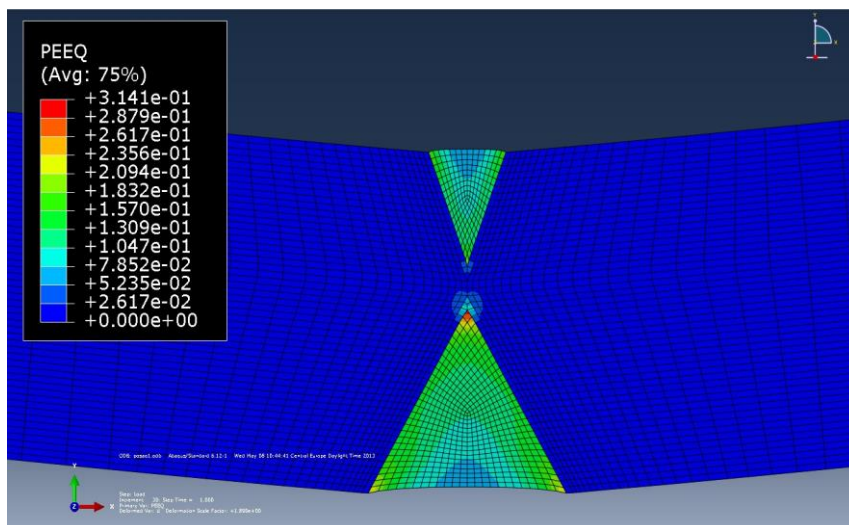


Slika 2.13 Zakrivljen model zavarenog spoja sa mrezom konačnih elemenata u Abaqusu /2.8/

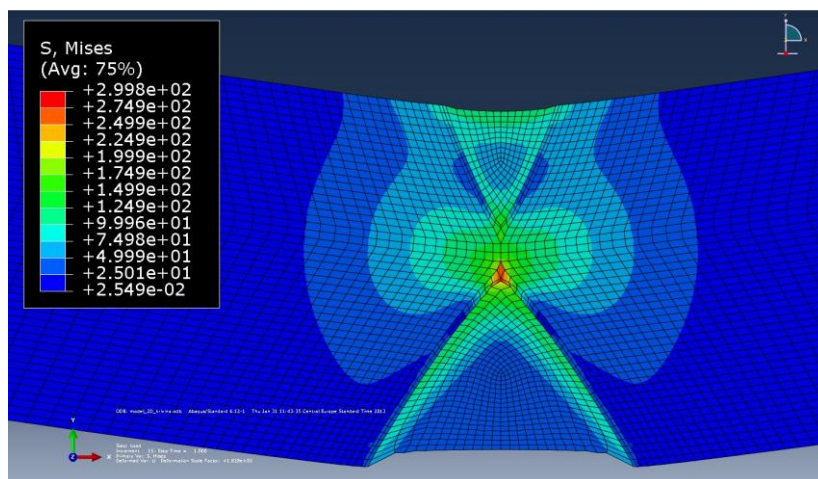
Rezultati sledeća dva modela biće prikazani na sledećim slikama 2.14-2.17 /2.8/.



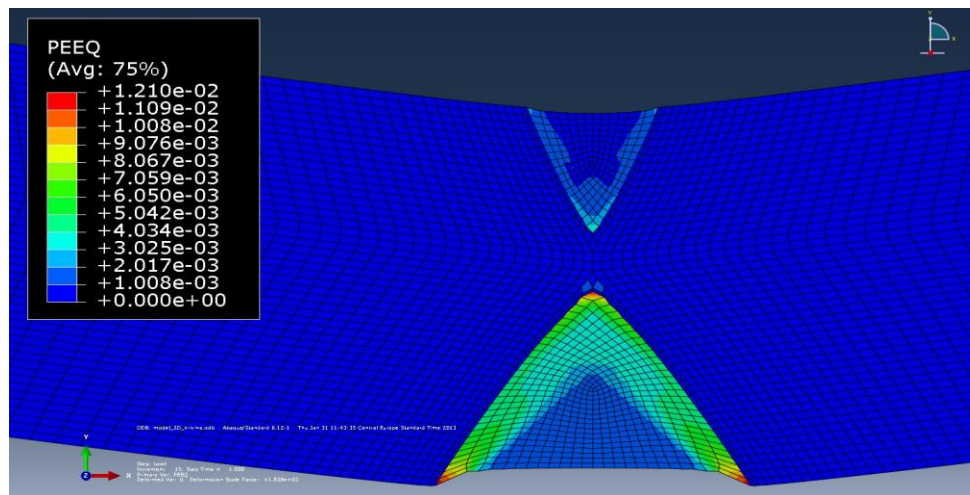
Slika 2.14 Raspodela napona na ravnom modelu /2.8/



Slika 2.15 Plastične deformacije na ravnom modelu /2.8/



Slika 2.16 Raspodela napona na zakrivljenom modelu/2.8/



Slika 2.17 Plastične deformacije na zakrivljenom modelu /2.8/

Treba napomenuti da na ovom 2D modelu nije uzeto u obzir ponašanje ZUT, jer u drugačijem slučaju ne bi mogli dobiti pouzdane rezultate. Možemo još zaključiti da se najveće naprezanje javlja u korenorn prolazu, što je i očekivano. Poređenjem ova dva modela možemo videti da zakrivljeni model daje dosta bolji raspored napona i plastičnih deformacija zbog bolje geometrije tela. Još se može primetiti da se 2D zakrivljeni model približno isto ponaša kao i 3D model na mestu najvećih koncentracija napona.

Numeričkom simulacijom 2D modela zavarenog spoja u zoni najveće deformacije (u oblasti merne trake 34) kada se dostigne pritisak od 12,05 MPa pokazujemo da je geometrija zavarenog spoja, dodatni materijal, osnovni materijal zadovoljavaju uslove čvrstoće i to uz prisustvo zaostalih plastičnih deformacija.

Na ovaj način se može praviti beskonačan broj numeričkih simulacija zavarenih spojeva, jer imamo dosta mernih mesta na prototipu, ali je u dosadašnjem istraživanju posmatrano najkritičnije mesto što je uvek glavna tema za razmatranje.

Na osnovu prethodnih ispitivanja možemo zaključiti da se posmatrao samo zavareni spoj LS1, koji predstavlja najkritičnije mesto sa aspekta zaostalih plastičnih deformacija. Dosadašnja istraživanja nisu dovoljna da bi se procenio integritet celeg napojnog cevovoda RHE „Bajina Bašta“ kao celine, koji je projektovan sa smanjenim stepenom sigurnosti i koji se nalazi u eksploataciji oko 40 godina. Iz toga razloga se i stvorila potreba za formiranje ove teze, kako bi se napravio adekvatni numerički model koji će uzeti u obzir treći segment, koji do sada niko nije razmatrao i posmatraće se ponašanje zavarenih spojeva LS4 i LM2, slika 7.4, koji su projektovani sa različitim postupcima zavarivanja. Nakon numeričke analize dobijeni rezultati će se uporediti sa eksperimentalnim i na taj način ćemo dobiti kompletno ponašanje osnovnog materijala, zavarenih spojeva u najopterećenijem delu cevovoda koji je naravljen od čelika Sumiten SM80P. Ovim matematičkim modelom dobićemo kompletnu procenu integriteta zavarene konstrukcije kao celine, koji će se u budućnosti moći koristiti kao glavni pokazatelj integriteta cevovoda tokom njegove eksploatacije. Nakon toga ćemo oceniti rizik na osnovu integriteta cevovoda.

3. OSOBINE I PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA

U toku izrade zavarene konstrukcije dolazi do manjih ili većih promena osobina OM i DM pod uticajem parametara tehnologije izrade. Osobine materijala se menjaju samo u određenim, kritičnim zonama, pri čemu veličina i položaj ovih zona, kao i promena osobina materijala zavise od njihovih polaznih osobina i parametara tehnologije izrade. Da bi se moglo proceniti ponašanje zavarene konstrukcije u eksploataciji i pre svega, da bi se mogla proceniti sklonost njenih zavarenih spojeva ka pojavi prslina treba poznavati osobine materijala u tim kritičnim područjima i njihovo ponašanje u stvarnim uslovima eksploatacije i proračun i postupak izrade zavarene konstrukcije podesiti prema ovim kritičnim zonama. Ovo predstavlja osnovu za procenu sigurnosti zavarene konstrukcije u eksploataciji.

Zavareni spoj predstavlja celinu sastavljenu od OM, ZUT i MŠ. Pri tome ZUT predstavlja niz zona sa različitim strukturama i sa različitim osobinama. U ZUT će se pojaviti zavisno od unete količine toplote na različitim rastojanjima od linije stapanja, različite strukture i sa tim u vezi veće ili manje razlike osobina materijala. Faktori koji opredeljuju strukture metala u ZUT su polazno stanje, tj. hemijski sastav i način ojačavanja OM, kao i temperaturni režim zavarivanja u ovoj zoni. Završetak metalurških transformacija i širina zona u kojima se pojavljuju pojedine strukture zavise od karakteristika termičkog režima u svakoj tački ZUT, a naročito od brzine hlađenja. Osobine MŠ zavise od hemijskih sastava OM i DM i od količine unete toplote pri zavarivanju, koja utiče na udele OM i DM u MŠ, dimenzije tečnog kupatila, raspored i nivo temperatura u MŠ, uslove prenosa DM, metalurških reakcija i uslova kristalizacije.

Svaki zavareni spoj sadrži greške, bez obzira koliko pažljivo on bio zavaren. Greške u zavarenim spojevima su metalurško - tehnološke i subjektivne greške izvođenja. Metalurško-tehnološke greške nastaju zbog nedovoljno prilagođenog metalurško - tehnološkog tretmana metala u toku zavarivanja. U ovu grupu spadaju: prsline (tople, hladne, lamelarne i prsline od naponskog žarenja), uključci, pore i odstupanja od zahtevanih osobina (npr. nedovoljna čvrstoća ili plastičnost metala). U subjektivne greške izvođenja spadaju greške formiranja šava npr. neprovar, naspojena mesta, preveliko nadvišenje i ivični zajedi. Sa razvojem novih tehnologija zavarivanja i novih materijala broj grešaka u zavarenim spojevima se smanjuje. Greške su sastavni deo zavarenih spojeva i nije realno očekivati da je moguće proizvesti spojeve bez grešaka.

3.1. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE

Iz ove grupe čelika najviše se koriste niskolegirani čelici, kaljeni i opušteni. Ovi čelici se, uslovno, mogu smatrati dobro zavarljivim materijalima. Nepoželjne pojave koje se uočavaju pri njihovom zavarivanju su povećanje tvrdoće, smanjenje žilavosti, povećanje prelazne temperature krtosti i pojava prslina u ZUT. Navedene pojave povećavaju sklonost zavarenih spojeva ka krtom lomu, zbog čega je osnovni problem u obezbeđenju sigurnog rada njihovih zavarenih konstrukcija obezbeđenje od pojave krtog loma.

Istraživanja zavarljivosti ovih čelika su uglavnom usmerena na izučavanje nastanka hladnih prslina i sprečavanje njihove pojave /3.1 - 3.6/. Istraživanja su pokazala da sklonost ka pojavi hladnih prslina raste sa pojavom tvrdih i krtih struktura, porastom sadržaja vodonika i porastom intenziteta krutosti.

Poznato je niskolegirani čelici koji su kaljeni i opušteni sadrže maksimalno do 0,2% C. Zbog toga martenzit koji nastane u ZUT, ima relativno dobru žilavost. Potreba da se izbegnu tvrde i krte strukture uz izbegavanje predgrevanja pri izradi zavarenih konstrukcija nametnula je razvoj novih generacija čelika povišene čvrstoće sa još nižim sadržajem C. Na ovaj način je postignuto da se u ZUT dobija martenzit sa još boljom žilavošću ili da se pojava martenzita, kao najnepovoljnijeg tvrdog i krtog mikrokonstituenta potpuno izbegne. Takođe, do povećanja krtosti HSLA čelika može doći i usled porasta zrna. Niskolegirani čelici pokazuju veću sklonost ka pojavi krtosti usled porasta zrna u odnosu na druge niskougljenične i niskolegirane čelike. Zbog toga ponovno zagrevanje njihovih zavarenih spojeva, npr. u cilju otpuštanja zaostalih napona, nije prepuručljivo. Uticaj hemijskog sastava na pojavu tvrdih i krtih mikrokonstituenata, odnosno, na sklonost ka pojavi hladnih prslina je definisana realcijama za izračunavanje CE. U literaturi postoji veći broj ovih relacija /3.7/. Sve one, u suštini, pokazuju uticaj pojedinih legirajućih elemenata na sklonost čelika ka zakaljivanju. Veći broj relacija se pojavljuje zato što su uticaji pojedinih legirajućih elemenata određivani u različitim uslovima. Pojava krtosti u ZUT se teško izučava zbog njene složene strukture. Posebno je složena struktura ZUT višeprolaznih šavova. Ovaj ZUT sadrži veći broj zona koje su pretrpele različite termičke cikluse ili su pretrpele višestruke termičke cikluse. Zbog malih dimenzija osobine ovih zona se teško izučavaju. Tek u novije vreme u literaturi /3.8/ su se pojavili podaci o ponašanju pojedinih delova ZUT ove grupe čelika. Ovo je omogućeno nakon što je razvojem opreme za simulacije termičkog ciklusa zavarivanja omogućena izrada dovoljno velikih uzoraka za ispitivanja. Za određivanje krtosti usled porasta zrna u literaturi /3.9/ postoje dijagrami koji, za svaku vrstu ovoga čelika pojedinačno, pokazuju zavisnost maksimalne dozvoljene količine unete toplote pri zavarivanju od temperature predgrevanja i debljine zavarivanog materijala, tj. pokazuju najmanju dozvoljenu brzinu hlađenja pri kojoj porast zrna uslovljen zagrevanjem još ne izaziva bitan pad žilavosti.

Uticaj vodonika na porast krtosti i time sklonosti ka pojavi hladnih prslina se ogleda kroz sposobnost atoma vodonika da se okupljaju na greškama u metalnoj rešetci. Zahvaljujući malom prečniku atomi vodonika lako difunduju kroz metalnu rešetku i okupljaju se na greškama u njoj, a naročito na vrhovima mikroprslina. Na ovim mestima oni prelaze iz atomarnog u molekularni oblik značajno povećavajući unutrašnji parcijalni pritisak. Povećanje ovog pritiska smanjuje zatezni napon koji je potreban za kidanje međuatomskih veza ispred vrha mikroprslina što znatno olakšava njen rast. Proizvođači ove grupe čelika su, uočavajući ovakav uticaj vodonika, razvili novu generaciju mikrolegiranih čelika koji imaju znatno manje grešaka u kristalnoj rešetci i samim tim znatno manje potencijalnih mesta za nastanak mikroprslina /3.10/. Ovakvi čelici su znatno otporniji na pojavu krtosti izazvanu vodonikom zbog čega su našli široku primenu u proizvodnji opreme za skladištenje i transport nafte i naftnih derivata i materija kao što su npr. amonijak i vodonik sulfid. Vodonik, u zavareni spoj, češće dospeva iz DM ili zaštitne atmosfere luka. Ovaj vodonik difunduje iz MŠ u ZUT čelika izazivajući pojavu prslina. Sklonost ka pojavi prslina raste sa porastom

koncentracije vodonika zbog čega je važno da se količina vodonika koji se unese u MŠ tokom zavarivanja svede na minimum.

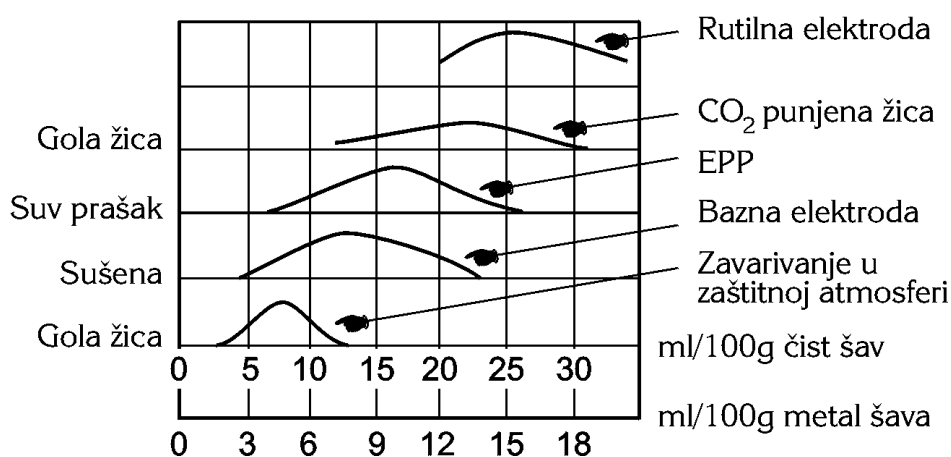
Na slici 3.1. su date vrednosti difundovanog vodonika u MŠ (dobijenog mešanjem OM i DM) i čistom šavu (dobijenom samo od DM), za različite postupke zavarivanja /3.11/. Neki autori u svojim radovima daju količinu difundovanog vodonika u šavovima dobijenim samo od DM (bez mešanja sa OM). U proračunima za određivanje sklonosti čelika ka hladnim prslinama koriste se samo podaci za vrednosti difundovanog vodonika u MŠ koji je dobijen mešanjem OM i DM. Količina difundovanog vodonika zavisi i od parametara zavarivanja i npr. raste sa povećanjem jačine struje i napona pri zavarivanju /3.12/.

Intenzitet krutosti može da se izrazi kao:

$$K = K_0 h, \quad (10 \text{ N/mm}^2) \quad (3.1)$$

gde je konstanta $K_0 = 69$; h – debljina lima u mm. Navedena relacija važi za debljine limova do ~150 mm. Za limove debljine do 38 mm, Suzuki i Yurioka preporučuju sledeći izraz /3.13/:

$$K = 1352 h - 14,75 h^2 \quad (3.2)$$



Slika 3.1. Vrednosti difundovanog vodonika u metalu šava i čistom šavu (formiranom samo od dodatnog materijala), za različite postupke zavarivanja /3.18/

Imajući u vidu sva tri faktora koji utiču na pojavu hladnih prslina (zaostali naponi, povećanje tvrdoće usled strukturnih promena i prisustvo vodonika u metalu šava i ZUT), kao i mnogobrojne eksperimentalne rezultate, Ito i Bessio su izveli parametarsku relaciju za ocenu sklonosti ka pojavi hladnih prslina koja glasi /3.14/:

$$PW = PCM + H/60 + K/(40 \times 104), \quad (\%) \quad (3.3)$$

gde je: P_w – sklonost čelika ka obrazovanju hladnih prslina; $P_{CM} = C_E$ prema izrazu (2.4.); H – količina difundovanog vodonika u metalu šava (ml/100mg); K – intenzitet krutosti zavarenog spoja.

$$C_E = PCM = C + Mn/20 + Mo/15 + Ni/60 + Cr/20 + V/10 + Cu/20 + Si/30 + 5B \quad (3.4)$$

Preporučene vrednosti ekvivalenta ugljenika za pojedine mikrolegirane čelike su /3.15/: za normalizovane čelike C_E : 0,38-0,43; za kontrolisano hladne čelike C_E : 0,34-0,40; za ubrzano hladne čelike C_E : 0,30-0,36. Merenja su pokazala da je čelik osetljiv na pojavu hladnih prslina ako je $P_w > 0,286$ /3.16/.

U cilju sprečavanja obrazovanja hladnih prslina primenjuje se predgrevanje u toku zavarivanja. Za određivanje temperature predgrevanja postoji veliki broj relacija, od kojih jedna glasi /3.14/:

$$T (0^\circ\text{C}) = 1440 PW - 392 \quad (3.5)$$

3.2. PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE TOKOM ZAVARIVANJA

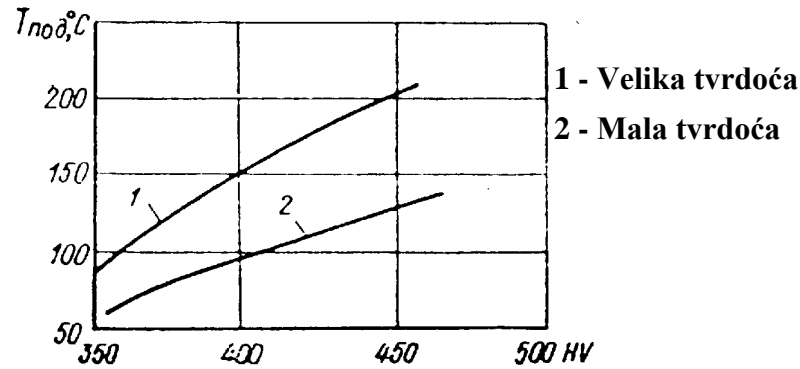
Smanjenje opasnosti od krčkog loma zavarenih konstrukcija je glavni zadatak izbora termičkog režima zavarivanja i termičke obrade posle zavarivanja. Uvođenje predgrevanja - tipične operacije pri zavarivanju nisko i srednje legiranih čelika - ima za cilj uklanjanje hladnih prslina na račun smanjenja brzine hlađenja delova pune prekrizacije. Operacija odmora ili niskotemperaturnog otpuštanja, koristi se obično kao međuoperacija između zavarivanja i visokog otpuštanja, takođe služi u cilju smanjenja stepena napetosti neuravnoteženih struktura i obezbeđuje uklanjanje iz tih delova vodonika, jednog od glavnih uzroka pojave prslina. Otpuštanje ili potpuna toplotna obrada uvodi se za maksimalno povećanje žilavosti i plastičnosti raznih zona spojeva i skidanja zaostalih napona od zavarivanja/3.15/.

Za ugljenične i niskolegirane čelike povišene čvrstoće, određivanje zakaljenih struktura sklonih pojavi prslina, moguće je izvesti ocenom tvrdoće zone oko šava. Njena dozvoljena vrednost iznosi HV350 za ručno elektrolučno zavarivanje rutilnim elektrodama i HV400 za elektrode sa bazičnom oblogom, sušene na temperaturi 450°C. Takva razlika u vrednostima tvrdoće povezana je s velikom količinom vodonika u šavovima izvedenim rutilnim elektrodama.

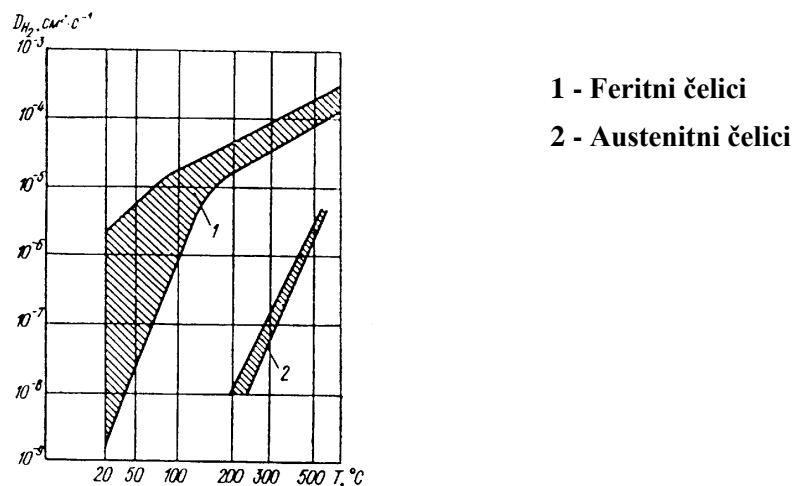
Pri prelasku ka više legiranim čelicima, kod kojih se visoka tvrdoća u zoni oko šava promenom režima zavarivanja i uvođenja umerenog pregrevanja ne može da smajni, osnovnu pažnju treba posvetiti stvaranju uslova za evakuaciju vodonika iz zone zavarenog spoja. Pošto sklonost ka obrazovanju prslina, izazvanih vodonikom, raste sa povećanjem tvrdoće u ZUT i tvrdoće šava, to odgovarajuće raste i potrebna temperatura predgrevanja.

Već uvođenje predgrevanja sa temperaturom iznad 100°C obezbeđuje primetno veću brzinu izdvajanja vodonika iz zavarenog spoja usled naglog povećanja difuzione pokretljivosti u intervalu temperatura 20 - 150°C /3.16/.

Posebnu pažnju pri zavarivanju ovih čelika treba posvetiti izboru vrste zavarivanja i materijala, koji obezbeđuju minimalnu količinu polaznog difuzionog pokretnog vodonika u šavu. Zavarivost konstrukcijskih čelika povišene čvrstoće, određena je njihovom sklonošću ka obrazovanju prslina i znatno se snižava sa povećanjem sadržaja ugljenika u njima. Zato je jedan od osnovnih zahteva snižavanja ugljenika u sastavu tih čelika. Tako, po japanskim standardima, sadržaj ugljenika u čelicima sa granicom razvlačenja do 800 N/mm² ne treba da prelazi C=0,18%. Takva tendencija se oseća i u našem standardima, u kome se traži da bude C<0.18%, odnosno dopušta se da najviši sadržaj bude C=0,20 - 0,23%. Povećanje sadržaja ugljenika otežava zavarivanje i iziskuje skupo visoko predgrevanje.



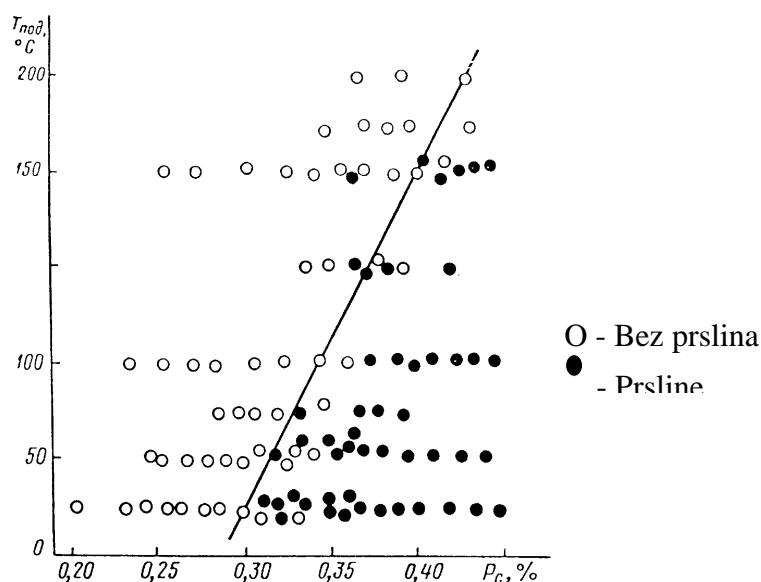
Slika 3.2. Maksimalna. temperatura predgrevanja pri zavarivanju konstrukcijskih mikrolegiranih čelika /3.18/



Slika 3.3 Koeficijent difuzije vodonika feritnih i austenitnih čelika u zavisnosti od temperature/3.18/

Količina difuzionog vodonika u šavu i ZUT sme da bude najviše 6 cm³/100 g istopljenog metala. Količina vodonika se utvrđuje glicerinskom metodom. Sušenjem elektroda na temperaturi 300-350°C preko 2 h sadržaj vodonika se snižava ispod 5 cm³/100g, a sušenjem na temperaturi 400-420°C do 2 h, za prečnike 4-6 mm, obezbeđuje se sadržaj H₂ ispod 3 cm³/100g. Na sl. 3.4 je data zavisnost temperature predgrevanja i sklonosti prema obrazovanju prslina Pc. U jednom području su prsline verovatne, dok ih u drugom području nema.

Za slučaj zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće, kada se poštuje uslov $0.25 < Pc < 0.4$ iz japanskog dokumenta IX 958/76, za proračun temperature predgrevanja preporučuje se sledeći obrazac: $T_{pr} = 1440 \cdot Pc - 392^\circ C$, što je uneto u standard za predgrevanju čelika, povišene i visoke čvrstoće, treba voditi računa i pri toplotnom rezanju. Ako je brzina rezanja velika, mogu da se pojave prsline na reznj površini ako je hlađenje brzo, ili velike tvrdoće metala. Da bi se ovo izbeglo treba predgrevati najmanje 100 mm oko žleba do približno 30°C u slučaju kada je temperatura radnih komada ispod +10°C, odnosno od 120°C do 200°C u slučaju kada je debljina proizvoda veća od 50mm i za slučaj rezanja krajeva, ukoliko je potrebno dalje oblikovanje na hladno, na primer savijanjem i zavrtanjem /3.17/.



Slika 3.4. Uticaj temperature predgrevanja na sklonost ka obrazovanju prslina /3.18/

Rezne površine koje bez dalje mehaničke i toplotne obrade ulaze bez zavarivanja u sastav konstrukcije, potrebno je, takođe, pre termičke obrade, predgrevati na temperaturu 120-200 °C. Ukoliko je tvrdoća ipak vrlo velika ili se javljaju prslina, stranicu žljeba dobijenu rezanjem treba termički ili mehanički obraditi. Stranice dobijene termičkim rezanjem koje su dinamički napregnute treba mehanički obraditi na glodalici.

Čelici povišene čvrstoće mogu da se zavaruju svim postupcima zavarivanja koji se primenjuju u industrijskoj proizvodnji, uz poštovanje odgovarajućih pravila zavarivanja i primenu odgovarajućih mera. Najvažniji problemi pri zavarivanju su nastanak prslina na hladno i smanjenje otpornosti na krti lom u ZUT.

Za zavarivanje ove grupe čelika koriste klasične vrste zavarivanja u prvom redu E, TIG i EPP. Postoji rizik od pojave prslina na hladno kod čelika povišene i visoke čvrstoće, ukoliko se primenjuju relativno male količine unete toplote i dozvoli visok sadržaj vodonika. S druge strane primenom postupka zavarivanja sa velikom količinom unete toplote smanjuju se žilavost i čvrstoća ZUT.

Dodatni materijal treba da ima približno iste mehaničke osobine kao osnovni materijal. Znatno više mehaničke osobine metala šava od mehaničkih osobina OM treba izbegavati. Za dobijanje žilavih zavarenih spojeva treba koristiti bazične elektrode, odnosno prašak bazičnog tipa. Može se koristiti i MAG zavarivanja, pri čemu se mora videti računa o kvalitetu žice. Inertni gasovi ako se radi TIG zavarivanjem treba da imaju tačku rose na (-50 °C), a aktivna mešavina na (-40 °C).

Za koreni zavar koriste se dodatni materijali veće plastičnosti. Kod OM čija je granica razvlačenja $>460 \text{ N/mm}^2$ postoji opasnost od pojave prslina pri izvođenju korenog zvara, pa se iz tog razloga koristi DM (dodatni materijal) veće plastičnosti.

4. MEHANIKA LOMA I INTEGRITET ZAVARENIH SPOJEVA

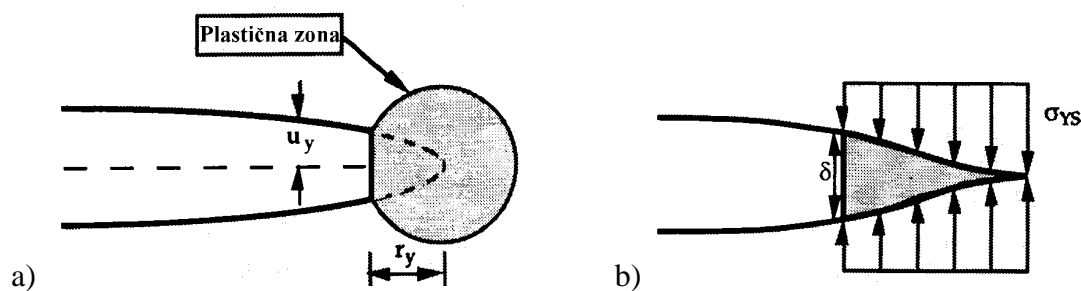
Mehanika loma je naučna disciplina koja se bavi problemima prslina i njihovog uticaja na ponašanje materijala i konstrukcija. Mehanika loma je počela svoj razvoj početkom XX veka radovima Inglisa o koncentraciji napona i Grifita o brzini oslobađanja energije, a sredinom veka Irvin je postavio temelje linearno elastične mehanike loma uvođenjem faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti, žilavosti loma. Dalji razvoj ove naučne discipline obuhvatio je njeno proširenje na elasto-plastičnu oblast analizom plastične zone ispred vrha prsline i uvođenjem odgovarajućih parametara – otvaranja vrha prsline, CTOD i J integrala. Jedan od glavnih razloga za uvođenje i primenu EPML su zavareni spojevi, kod kojih je pojava lokalne plastične deformacije neminovna, posebno u slučaju velike razlike u nivoima napona tečenja. /4.2/

Praktična primena mehanike loma od samog početka se zasnivala na dvostranom tumačenju njenih parametara: s jedne strane oni predstavljaju opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući geometriju prsline, a sa druge strane svojstvo materijala, odnosno njegovu otpornost na rast prsline. Time je mehanika loma postala značajno oruđe u rukama inženjera čiji je zadatak da lom spreče. U slučaju zavarenih spojeva, oba navedena tumačenja parametara mehanike loma moraju da uzmu u obzir heterogenost materijala. Stoga je u ovom poglavlju dat opis parametara mehanike loma, koji se koriste u daljem radu, sa posebnim osvrtom na uticaj heterogenosti materijala, tipične za zavarene spojeve.

4.1. OTVARANJE VRHA PRSLINE (CTOD)

Kada je Vels /4.1/ pokušao da izmeri K_{Ic} kod konstrukcionih čelika primetio je da su se površine prslina razdvojile pre loma, a da je plastična deformacija zatupila oštar vrh prsline. Kako je zatupljenje vrha prsline raslo proporcionalno žilavosti materijala, to je Vels predložio otvaranje vrha prsline (eng. Crack Tip Opening Displacement - CTOD) kao merilo žilavosti loma materijala. Iako očigledno ima iskustveni karakter, CTOD je našao veliku primenu, jer može jednostavno da se odredi, čak i u komplikovanim problemima, a daje dobre rezultate.

Osim toga, u oblasti srazmerno malog tečenja – (small scale yielding – SSY), može da se uspostavi veza između CTOD i K_I . Razmatrajući prslinu sa malom plastičnom zonom ispred vrha, slika 4.1.a, Irvin je pretpostavio da se takva prslina ponaša isto kao i prslina sa oštrim vrhom, ali malo veće dužine, $a+r_y$, gde je r_y Irvinova korekcija usled plastičnosti, opisano detaljnije u /4.2/.



Slika 4.1. Modeli otvaranja prsline: a) Irvinov, b) Dagdejllov (model trake popuštanja) /4.2, 4.26/.

Najveći problem u primeni CTOD je nedostatak teorijske osnove, pa nije čudno da postoji nekoliko različitih tumačenja za CTOD. Osim uobičajenih definicija, prikazanih na slika 4.2, često koristi i Švalbeova definicija δ_5 , /4.3/, odnosno direktno određivanje CTOD.



Slika 4.2. Definicije CTOD: a) rastojanje lica na mestu vrha prsline, b) presek sa otvorom 90° /4.2, 4.26/.

4.2. J INTEGRAL

Iako je CTOD priznat i široko primenjivan parametar EPML, posebno kod zavarenih spojeva, treba biti svestan njegove osnovne mane, a to je nedostatak teorijske osnove. Stoga je razumljivo uvođenje još jednog parametra EPML, J integrala, koji je teorijski utemeljen u osnovnim zakonima mehanike kontinuuma, Rajs /4.4/. Postoje tri bitne odlike J integrala, na kojima se zasniva njegova primena u mehanici loma:

1. Nezavisnost od putanje integracije, što omogućava jednostavno numeričko, analitičko i eksperimentalno određivanje.
2. Mogućnost opisa elasto-plastičnog polja napona i deformacije oko vrha prsline, analogno ulozi faktora intenziteta napona u opisu odgovarajućih linearno elastičnih polja.
3. Mogućnost identifikacije sa brzinom oslobađanja energije, što obezbeđuje njegovo tumačenje kao energetskog parametra.

U svakom od navedenih svojstava je 'ugrađeno' i ograničenje u primeni ovog parametra, koje sledi iz zahteva da se elasto-plastično ponašanje materijala definiše u okviru tzv. deformacione teorije plastičnosti. Strogo gledano, ovo znači da J integral važi samo u slučaju da nema rasterećenja u oblasti plastične deformacije, što je po pravilu ispunjeno kod srazmerno malih plastičnih deformacija i malog rasta dužine prsline. Osim toga, heterogenost materijala u pravcu koji nije paralelan sa prsline može da predstavlja ozbiljnu prepreku u primeni. Iskustvo, međutim, pokazuje da J integral može uspešno da se primeni i van navedenih granica, a postoje i teorijska razmatranja koja daju potvrdu takvim stavovima, kao što je dateljno opisano u /4.5, 4.6.-4.8, 4.9-4.11, 4.12/

4.3. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA

Prve predloge standarda za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji su objavili Američko društvo za ispitivanje i materijale (American Society for Testing and Materials - ASTM) - ASTM E399-70T, i Britanska institucija za standarde (British Standard Institution - BSI) - DD 3. Ovi predlozi su prihvaćeni pod naslovom "Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma pri ravnoj

deformaciji metalnih materijala" kao ASTM E399-87 /4.13/, odnosno BS 5447, /4.14/. Nešto kasnije je BSI objavio predlog standarda za određivanje otvaranja prsline DD 19, usvojen kao BS 5762 i konačno objedinjen sa BS 5447 u BS 7448, /4.15/. U međuvremenu, predložen je veliki broj ASTM standarda za ispitivanje epruveta sa prslinama, od kojih su najviše korišćeni:

- ASTM E813-89: Standardni postupak ispitivanja J_{Ic} , mere žilavosti loma /4.16/.
- ASTM E1152-87: Standardni postupak ispitivanja za određivanje $J-R$ krive /4.17/.
- ASTM E1290-89: Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma merenjem otvaranja vrha prsline /4.18/.
- ASTM E1737-96: Standardni postupak ispitivanja za određivanje žilavosti loma pomoću J integrala, /4.19/. Ovaj standard je objedinio dva standarda (E813 i E1152), koji su u najvećem delu podudarni.

Godine 1999. definisan je standard po ASTM oznake E1820 koji je objedinio standarde E399, E1290 i E1737. Naziv ovog standarda "Standardni postupak ispitivanja za merenje žilavosti loma" /4.20/. Najnovija verzija ovog standarda je iz 2020. godine.

Postoje mnogobrojne zajedničke odlike eksperimentalnog određivanja parametara mehanike loma, posebno kada se mere njihove kritične vrednosti, odnosno svojstva materijala. Kao potvrda navedenog može da posluži najnoviji standard iz ove oblasti, ASTM E1820, koji objedinjuje merenje žilavosti loma kao kritične vrednosti bilo kog od tri osnovna parametra mehanike loma - K_{Ic} , $CTOD_{Ic}$ ili J_{Ic} .

4.4. PROCENA INTEGRITETA KONSTRUKCIJE

Primena mehanike loma je donela značajne promene u inženjerskoj praksi. Kao primer za ilustraciju ove tvrdnje mogu da se navedu problemi sa Aljaska cevovodom i primena principa konstruisanja sa sigurnošću od loma. U slučaju cevovoda od Aljaske do SAD, po prvi put su kriterijumi mehanike loma prihvaćeni kao merodavni, umesto previše konzervativnih standarda o dozvoljenim greškama u zavarenom spoju /4.21/. Naime, kada je metodama ispitivanja bez razaranja (IBR) utvrđen veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po tada važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje ekonomske opravdanosti, odnosno tehničke neophodnosti popravke. Detaljna analiza parametara mehanike loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha prsline, obuhvatila je s jedne strane procenu sile rasta prsline, a s druge strane otpornost materijala (metal šava) na rast prsline /4.22-4.26/. Rezultati ovog istraživanja su zvanično prihvaćeni, pa je obim popravke drastično smanjen, čime su izbegnuti nepotrebni troškovi, a takođe i opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavarivanjem. Možda je najvažnije istaći da je na osnovu ovog istraživanja zaključeno da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dopušteni izuzetak od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako takva analiza daje ubedljivu i konzervativnu (sigurnu) procenu integriteta konstrukcije.

Postoji nekoliko načina da se pri proceni integriteta konstrukcije uzme u obzir plastičnost materijala, svode se na primenu otvaranja vrha prsline ili J integrala, kao merodavnih parametara EPML. Otvaranje vrha prsline (crack tip opening displacement - CTOD), iako nema 'čvrstu'

teorijsku osnovu, ima veliku praktičnu primenu, pre svega zbog jednostavnosti određivanja. S druge strane, J-integral, po pravilu zahteva komplikovaniji postupak određivanja, ali kao energetski parametar, teorijski utemeljen u osnovnim zakonima mehanike kontinuuma, ima i podjednako važnu praktičnu primenu.

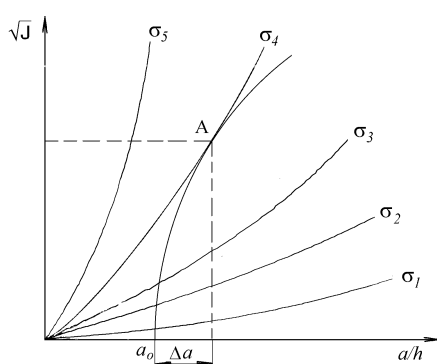
Primena J integrala na procenu integriteta konstrukcije podrazumeva njegovo dvojako tumačenje: prvo, po kome je J integral parametar EPML koji definiše geometriju tela sa prslinom i opterećenje (sila rasta prsline), i drugo, po kome je J integral merilo otpornosti materijala na rast prsline (J_{Ic} , odnosno J-R kriva). Osnovna razlika u ova dva tumačenja je u rastu prsline - dok je u prvom slučaju veličina prsline nepromenljiva i zajedno sa naponom se tretira kao parametarska veličina, dotle se u drugom slučaju porast njene veličine (dužine) podrazumeva. Kriterijum za početak stabilnog rasta prsline se formuliše matematički na sledeći način:

$$J(\sigma, a) = J_{Ic} \quad (4.1)$$

gde je $J(\sigma, a)$ sila rasta prsline, koja zavisi od udaljenog napona (opterećenja) σ i dužine (veličine) prsline a , dok je J_{Ic} otpornost materijala na početak (stabilnog) rasta prsline. Analiza rasta prsline se u slučaju EPML ne završava na primeni izraza 4.1, već uključuje stabilni rast prsline i uslov za početak njenog nestabilnog rasta, odnosno J-R krivu koja se pogodnim grafičkim predstavljanjem upoređuje sa SRP, slika 4.2. Matematički formulisan uslov za početak nestabilnog rasta prsline glasi:

$$\frac{\partial J(\sigma, a)}{\partial a} \geq \frac{\partial J}{\partial a} \quad (4.2)$$

odnosno prirast SRP mora da bude veći od prirasta otpornosti materijala pri istom prirastu dužine prsline. Dakle, kada $J(\sigma, a)$ dostigne vrednost J_{Ic} (izraz 3.1, presek krive SRP sa J-R krivom) počinje stabilni rast prsline, koji traje dok $\frac{\partial J(\sigma, a)}{\partial a}$ ne postane veće od $\frac{\partial J}{\partial a}$ (izraz 4.2, tangenta krive SRP na J-R krivu), posle čega sledi nestabilni rast prsline. Veličina stabilnog rasta se određuje kao razlika (po apscisi) navedenih tačaka (tj. tačke A i a_0 , slika 4.4, ako se uzme u obzir zatupljivanje).



Slika 4.3. Sile rasta prsline (parametarski zavisne od napona σ) vs. J-R kriva/4.2, 4.26/.

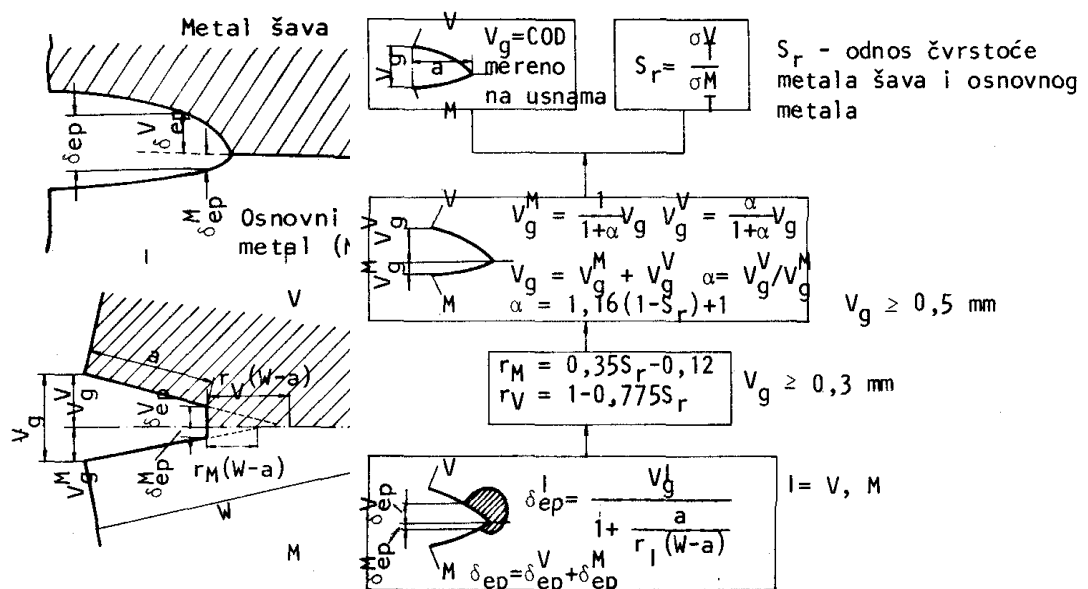
Sa praktične tačke gledišta važno je napomenuti da se SRP po pravilu određuju teorijsko-analitički ili numerički (npr. metoda konačnih elemenata), dok se J-R krive dobijaju eksperimentalno, npr. prema standardu ASTM E1820. Imajući u vidu potrebe ovog rada i

mogućnosti pojedinih modela, izabaran je Kingov model, koji može jednostavno da uzme u obzir heterogenost materijala, a problem koji se razmatra može da se svede na geometrijski jednostavne oblike koje ovaj model tretira. Stoga je ovaj model opisan u sledećem poglavlju, zajedno sa analizom mogućnosti primene na heterogene materijale.

4.5. PRIMENA MEHANIKE LOMA NA ZAVARENIM SPOJEVIMA

Analiza nosivosti i sigurnosti zavarenih spojeva je jedno od najznačajnijih područja primene mehanike loma, pre svega zbog eventualne pojave grešaka tipa prslina. Mnogobrojni primeri lomova zavarenih spojeva, izazvani prisustvom i rastom prslina ukazuju na potrebu za detaljnom analizom EPML zavarenih spojeva i procenom integriteta zavarenih konstrukcija. Međutim, takva analiza nije jednostavna, pre svega zbog heterogenosti strukture i osobina zavarenog spoja, i uticaja zaostalih napona i geometrijskih nesavršenosti. U cilju lakše analize pojedinih uticaja oni su u daljem tekstu dati posebno, ali treba imati u vidu da ih je često nemoguće razdvojiti, npr. uticaj heterogenosti materijala od uticaja mismеčinga koji je njegoVa direktna posledica. Ipak, najčešće se može smatrati da se uticaj heterogenosti materijala prvenstveno odražava na otpornost materijala na rast prsline (žilavost loma), a da mismеčing utiče na silu rasta prsline.

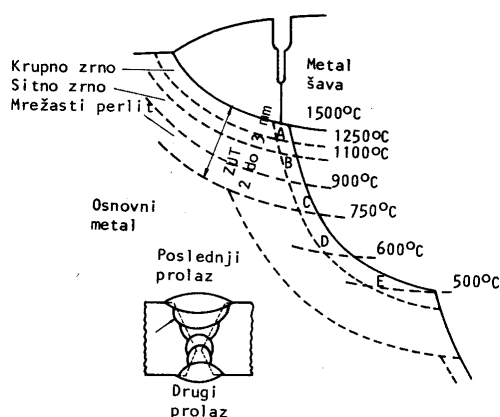
Imajući u vidu različitu strukturu zavarenog spoja uobičajeni postupak ispitivanja svojstava mehanike loma nije direktno primenjiv, pre svega zbog prolaska vrha prsline kroz područja različitih struktura i osobina zavarenog spoja. Različite osobine materijala u odnosu na ravan rasta prsline uslovljavaju asimetrično formiranje plastične zone ispred vrha prsline, što više dolazi do izražaja kod određivanja parametara elasto-plastične mehanike loma, a manje kod određivanja KIc . Kao ilustracija navedenog služi slika 4.4, gde je pokazano kako može da se odredi CTOD za prslinu na liniji stapanja na osnovu izmerenog CMOD i poznatih napona tečenja OM i MŠ /4.2/.



Slika 4.4. Prikaz postupka određivanja CTOD za prslinu na liniji stapanja/4.2, 4.26/

Složenost pri određivanju žilavosti loma zavarenih spojeva ilustruje slika 4.5, na kojoj je šematski prikazan višeprolazni šav niskolegiranog, termomehanički obrađenog čelika povišene čvrstoće. Po pravilu, kod ovakvih spojeva se u uzanom pojasu ZUT, uz liniju stapanja, nalaze oblasti smanjene žilavosti loma, npr. mesta označena sa A i E na slika 4.5, koju je teško locirati. Praktična istraživačka iskustva pokazuju da je potrebno ispitati desetine uzoraka da bi se uspešno locirao vrh prsline u kritičnom području i pouzdano odredile stvarne minimalne vrednosti žilavosti loma /4.2/.

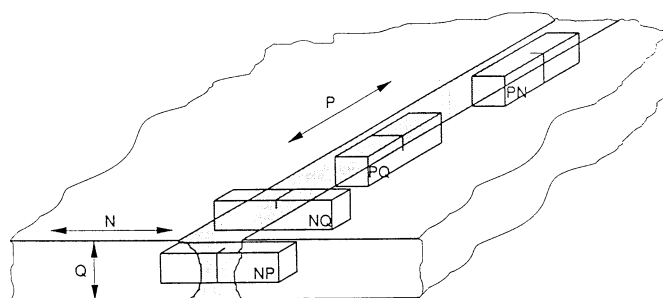
U fazi pripreme epruvete dodatni problem predstavlja nepravilni rast zamorne prsline zbog uticaja zaostalih napona, odnosno njihove neravnomerne raspodele po preseku. Da bi se taj problem rešio postoji nekoliko preporuka u standardu, koje ne daju uvek dobre rezultate, pa je ovaj problem još uvek predmet istraživanja.



Slika 4.5. Presek kroz ZUT niskolegiranog čelika povišene čvrstoće /4.2, 4.26/.

Konačno, pri analizi rezultata javljaju se dva problema. Prvi problem je određivanje lokalnih vrednosti napona tečenja, posebno u ZUT, što dodatno usložnjava postupak određivanja žilavosti loma. Drugi problem predstavlja tumačenje skoka prsline (tzv. “pop-in”), koji je usko povezan sa heterogenošću materijala, odnosno prisustvom lokalno krtih zona. Konačno, poseban problem predstavlja položaj prsline.

Na slici 4.6. prikazani su različiti mogući položaji zareza pri ispitivanju žilavosti MŠ. Kako se pri promeni položaja zareza lom inicira i širi kroz različite strukture to će se i rezultati ispitivanja bitno razlikovati.



N - pravac normalan na MŠ
P - pravac paralelan MŠ
Q - pravac po debljini MŠ

Slika 4.6. Način vađenja epruveta i položaj prsline pri ispitivanju metala šava /4.2, 4.26/

5. NAPOJNI CEVOVOD HIDROELEKTRANE “BAJINA BAŠTA“

U ovom poglavlju biće opisane karakteristike napojnog cevovoda hidroelektrane “Bajina Bašta” koji je projektovan od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće SUMITEN SM80P. Takođe će biti i opisana sama tehnologija zavarivanja cevovoda, jer je jako bitno da proces zavarivanja bude dobro odrađen što je pokazano u radovima /5.1-5.5/. U daljem razmatranju na ovom primeru iz prakse primenice se parametri mehanike loma i metode konačnih elemenata kako bi se dokazao integritet cevovoda koji je projektovan sa smanjenim stepenom sigurnosti.

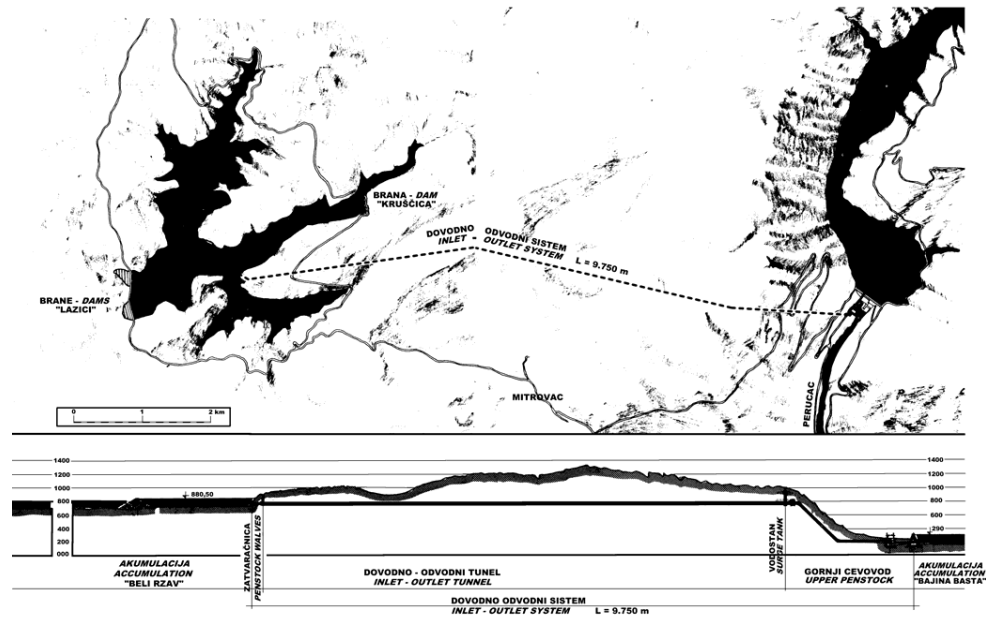
Iskustvo iz eksploatacije cevovoda hidroelektrana ukazuje na moguće procurivanje posle stabilnog rasta prsline koji može dovesti do krtog loma. Uvođenje zavarljivih čelika visoke čvrstoće za izradu cevovoda donosi značajne uštede, ali se zahteva otpornost prema prslinama, naročito prema krtom lomu osnovnog metala, metala šava i zone uticaja toplote. Za cevovod hidroelektrane “Bajina Bašta” korišćen je zavarljiv čelik visoke čvrstoće (do 700 MPa nazivnog napona tečenja), pa je investitor tražio dokaze o njegovoj otpornosti prema prslinama i krtom lomu. Prikazani su rezultati ispitivanja modela cevovoda i zavarenih spojeva, kojima je dokazana zadovoljavajuća zavarljivost čelika sa metalom šava niže čvrstoće (andermečing) i otpornost prema prslinama i krtom lomu /5.6/.

Takođe na kraju poglavlja, nakon opisa postojanja i tehnologija zavarivanja napojnog cevovoda biće prikazan proračun debljine zida cevovoda prema najnovijim standardima i direktivama za opremu pod pritiskom.

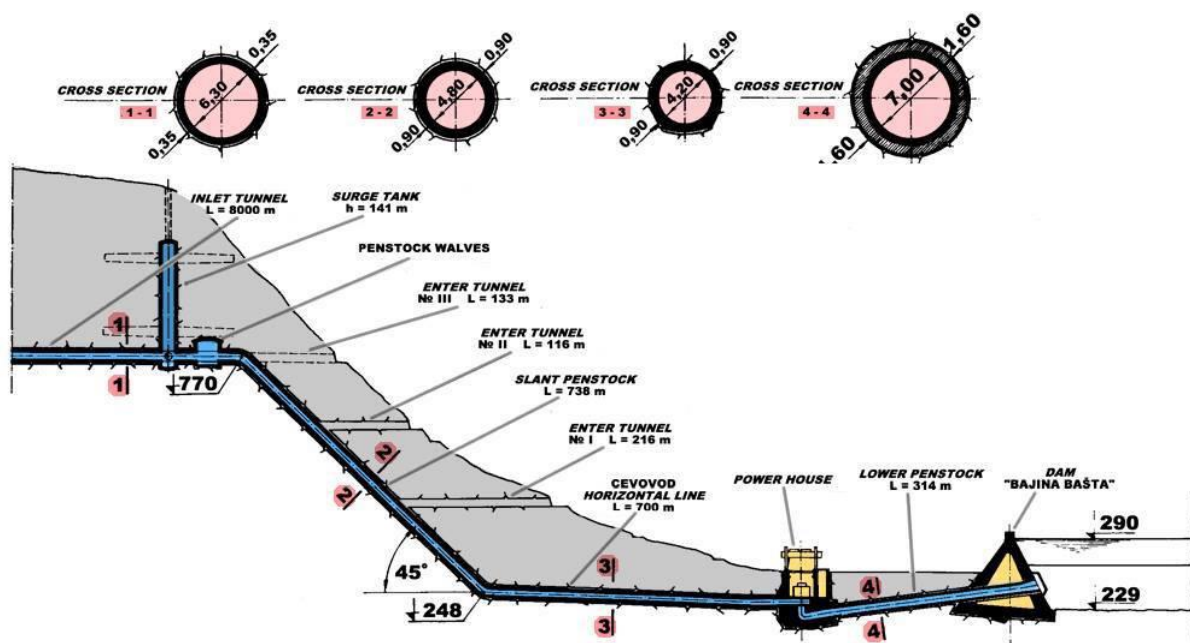
5.1 OPIS POSTROJENJA

Reverzibilna hidroelektana “Bajina Bašta“ velikog kapaciteta je u vreme projektovanja, pre oko 30 godina, predstavljala rešenje sa najvišim padom i brzinom vode u svetu. Projekt je izvela firma “Tošiba” iz Japana. Osnova projekta je jednostepena Francis reverzibilna pumpa-turbina sa dve jedinice, maksimalne snage 315 MW pri najvišem padu, i brzine od 428,6 o/min. Visina pumpanja je 621,3 m, protok 50,8 m³/s, maksimalna snaga pumpe 310 MW, brzina obrtanja 428,6 o/min. Broj obrta rotora je 650 o/min. Maksimalni pritisak u cevovodu je na 900 m/2.4/.

Na slici 5.1. je prikazan dovodno-odvodni sistem dužine 9750 m, koji povezuje akumulaciju „Beli Rzav“ sa turbinsko-pumpnim postrojenjem. Od kote 800 m (slika 4.2) spušta se dovodno-odvodni tunel sa čeličnom oblogom do vodostana i zatvaračnice na koti 770 m, na dužini 8000m. On se nastavlja gornjim cevovodom, u kosom delu dužine 738 m, pod nagibom 45° do kote 248 m i u horizontalnom delu dužine 700 m, do kote 216 m (slika 5.2). Projektant se odlučio za izradu cevovoda od čelika visoke čvrstoće, pa je za naopterećeniji segment izabran čelik napona tečenja 700 MPa, do tada primenjen na samo na nekoliko cevovoda /5.7/.



Slika 5.1. Gornja i donja akumulacija i dovodno-odvodni sistem hidroelektrane "Bajina Bašta"/2.4/.



Slika 5.2. Dispozicija gornjeg i donjeg cevovoda "Bajina Bašta" /7.1/

5.2 TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA CEVOVODA

Pre primene procesa zavarivanja jako bitno proveriti i posvetiti pažnju o samoj zavarljivosti osnovnog materijala. Kod ovih tipova čelika povišene čvrstoće mogu da se jave tri tipa problema kod zavarljivosti. Prvi problem je pojava lamelnog cepanja, drugi problem je pojava toplih prslina i treci kao najbitniji je sklonost ka pojavi hladnih prslina i krtom lomu.

Posto je sadržaj sumpora i fosfora u čelicima familije SUMITEN na jako malom nivo u odnosu na niskougljenične čelike, time je u startu smanjena sklonost ka pojavi lamelnog cepanja posto je nastanak segregacija tokom zavarivanja smanjena na minimum.

Takođe su rađene probe zavarivanja da bi se proverila sklonost ka pojavi toplih prslina, koje su najčešće posledica pojave segregacija po granicama zrna na temperaturnom intervalu od 900-1000°C. Nakon proba zavarivanja pokazalo se da neće biti opasnosti od pojave tzv. toplih prsina.

Na kraju ostaje samo da se posveti pažnja najvećem problemu kod čelika SUMITEN SM80P i S60P, a to je pojava od tzv. hladnih prslina, koji mogu dovesti do pojave krtog loma. Vrlo je jasno da do pojave hladnih prslina kod HSLA čelika dolazi usled prisustva difundovanog vodonika tokom procesa zavarivanja, pojave krtih struktura u zavarenom spoju i pojavom zateznih napona.

Svakako, ova pojava se može sprečiti izborom dobrog dodatnog materijala koji ima mali procenat vodonika u sebi, predgrevanjem pre početka zavarivanja, izborom adekvatnih parametara zavarivanja i ispravnom montažom delova cevovoda.

Sve ove mere su jasne teorijski, ali pri izradi i samoj montaži napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ bilo je veoma teško ispoštovati, a pri tome je otežano izborom OM, koji je imao veoma povišenu čvrstoću, malu rezervnu plastičnost i projektni stepen sigurnosti manji od predviđenog.

U nastavku poglavlja biće objašnjeni detalji koji su korišćeni tokom procesa zavarivanja kako bi se izbegle gore navedene pojave.

Zavarivanje se izvodi automatski pod praškom (EPP) sa žicom US 80 B Ø 3,2mm i praškom MF38B, a ručno elektrolučno (E postupak) bazičnom elektrodom L8 118 Ø 3,25 i Ø 4mm. Svojstva MŠ i ZUT u najvećoj meri zavise od parametara zavarivanja tačnog pridruživanja visine temperature predgrevanja i međuprolazne temperature, od unošene energije i slaganja prolaza i slojeva.

Temperatura pregrevanja i međuprolazna temperatura se moraju neprekidno kontrolisati. Uvek bi trebalo uzeti u obzir promene temperature kako ne bi doslo do pojave visokog sadržaja vodonika (H₂) u ZS.

5.2.1 Osnovni i dodatni materijal napojnog cevovoda

Osnovni materijal je niskolegirani čelik povišene čvrstoće koji je kaljen i otpušten. U pitanju je japanski čelik koji je predviđen za izradu cevovoda i posuda pod pritiskom **SUMITEN S80P**. Najveća pažnja u ovoj disertaciji biće posvećena ovom HSLA čeliku. Treba napomenuti da je dobar deo napojnog cevovoda projektovan od čelika iz familije SUMITEN sa nešto nižim mehaničkim karakteristikama od čelika SM80P, a u pitanju je čelik SM60P.

Čelik SUMITEN SM80P (Sumitomo-Japan) je kompleksno legiran HSLA čelik, degaziran u vakuumu. Nazivna vrednost granice tečenja je 700 MPa, a zatezne čvrstoće 800 MPa. Tipičan hemijski sastav dat je u tabeli 5.1. Ograničena vrednost ekvivalenta ugljenika C_{eg} obezbeđuje dobru zavarijivost čelika .

Tabela 5.1. Hemijski sastav čelika SM80P izražen u težinskim procentima (podaci proizvođača) /5.8/.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	B	Ceq
0,10	0,27	0,87	0,013	0,006	0,23	0,45	1,00	0,47	0,03	0,0015	0,49

U najvećem broju konstrukcija sudova pod pritiskom primenjuje se automatsko zavarivanje pod praškom s obzirom na veliku količinu unete toplote koju ovaj proces omogućava. Međutim, baš zbog velike količine unete toplote i visokih zateznih karakteristika utvrđeno je da dodatna žica za zavarivanje mora biti projektovana tako da se u metalu šava ostvari nešto niža čvrstoća od čvrstoće osnovnog metala, kako bi se rešio problem hladnih prslina. Ovaj "andermečing" efekt predstavlja suštinski drugačiji prilaz zavarenim konstrukcijama, jer je opšte prihvaćeno gledanje da metal šava treba da ima višu čvrstoću od OM da bi zavareni spoj ostvario očekivane karakteristike. Korišćenje "andermečing" efekta u zavarenom spoju u realnim konstrukcijama može izazvati značajne plastične deformacije metala šava, čak i u uslovima radnih pritisaka sudova pod pritiskom. Željene osobine zavarenog spoja u pogledu "andermečing" efekta i pojave hladnih prslina postignute su žicom US-80B i praškom MF-38B, koji su posebno razvijeni za zavarivanje čelika SM80P od strane firme "Kobe Steel" (Japan). Tipični hemijski sastav žice US-80B dat je u tabeli 5.2, a nazivne mehaničke karakteristike čistog šava, ostvarenog žicom US-80B i praškom MF-38B, u tabeli 5.3, prema podacima proizvođača/5.8/.

Tabela 5.2. Tipični hemijski sastav žice US-80B u težinskim procentima (podaci proizvođača) /5.8/.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Ø 4mm	0,09	0,19	2,15	0,014	0,013	0,49	0,84

Tabela 5.3. Tipične mehaničke karakteristike čistog šava ostvarenog žicom US-80B i praškom MF-38B /5.8/.

Granica tečenja σ_t [MPa]	Zatezna čvrstoća σ_m [Mpa]	Izduženje na 50mm [%]	Kontraktcija preseka [%]
687	804	23	52

5.2.2 Sušenje dodatnih materijala i temperatura predgrevanja

Pre početka zavarivanja elektrode se moraju sušiti u električnoj centralnoj peći najmanje 1 sati na temperaturi 350-450°C. Iz ove peći se elektrode prebace u priručnu peć koja se nalazi na radnom mestu zavarivača. U ovim pećima se moraju elektrode nalaziti kod temperature 150°C.

Prašak za EPP zavarivanje se mora pre upotrebe sušiti u peći na temperature 200°C najmanje 1h. Ako se za vreme rada prašak nalazi izvan peći više od 1h, mora se opet vratiti u peć i

ponovo sušiti na temperaturi 200°C. Ponovno sušenje praška dozvoljeno je izvesti samo jedanput. Prašak u posudi na automatu, koji je bio u kontaktu sa atmosferom i nije bio potrošen u roku od 4 sata, odbaciti.

Za vreme izvođenja radova neprekidno se mora kontrolisati spoljna temperatura i relativna vlažnost, pošto oba ova faktora bitno utiču na količinu (sadržaj) vodonika u zavaru, a time i na kvalitet ZS. Na mestu izvođenja radova mora se izvesti kontrola sadržaja vodonika u ZS, a to se mora izvesti u četiri slučaja:

- a) Kad spoljna temperatura iznosi manje od 25°C i relativna vlažnost manje od 80%.
- b) Kad spoljna temperatura iznosi manje od 30°C i relativnaa vlažnost više od 60%.
- c) Kad spoljna temperatura iznosi više od 30°C i relativna vlažnost manje od 80%.
- d) Kad spoljna temperatura iznosi više od 30°C i relativna vlažnost više od 80%.

Kod temperature okoline veće od 30°C i relativne vlažnosti veće od 80% zavarivanja se mora prekinuti. Zavarivanje se ne sme izvoditi, kad je atmosferska temperatura niža od 0°C.

Visina temperatura predgrejavanje, bez obzira na debijanu lima, za sučeone spojeve, zavisi od sadržaja vodonika u MŠ:

- 80°C kod sadržaja vodonika i manjeg od 1,0 ml/100 gr
- 120°C kod sadržaja vodonika i približno od 1,0 ml/100 gr
- 150°C kod sadržaja vodonika i od 1,0 do 1,5 ml/100 gr
- 170°C kod sadržaja vodonika i od 1,5 do 2,0 ml/100 gr
- 200°C kod sadržaja vodonika i većeg od 2,0 ml/100 gr

Predgrevanje se izvodi sa aparatima za predgrevanje buten - propan i vazduh.

Temperatura predgrevanja se meri 100 mm levo i desno od ZS. Temperatura predgrevanja kod zavarivanja heftova i popravki zavara mora biti za: 40°C veća od temperature predgrevanja kod normalnog zavarivanja spojeva - tabela 5.4. Izbor visine temperature predgrevanja se opet odabira s obzirom na sadržaj vodenika u MŠ.

Tabela 5.4. Temperatura predgrevanja zavarenih spojeva i heftova

Temperatura predgrevanja od zavarivanja spojeva	Temperatura predgrevanja kod zavarivanja heftova i popravki
80°C	120°C
100°C	140°C
120°C	160°C
150°C	190°C
170°C	210°C
200°C	240°C

5.2.3 Unos toplote i parametri zavarivanja

Iz podataka za probu zavarivanja, CCT dijagrama i implat probe, bila je izabrana granična vrednost za brzinu i vreme hlađenja koje za materijal SM80P iznose:

$$30 > \Delta t_{8/5} > 20^{\circ}\text{C/s}$$

$$10 < \Delta t_{8/5} > 15^{\circ}\text{C/s}$$

S obzirom na temperaturu određen je unos toplote (dovedena energija) za pojedine postupke zavarivanja suočenih spojeva, tabela 5.5.

Tabela 5.5 Unos toplote kod zavarivanja suočenih spojeva

Postupak zavarivanja	Temperatura predgrejavanja	Unos toplote
	°C	KJ/cm
Ručno elektro-lučno	80°C	26 – 38
	100°C	25 - 35
	120°C	22 - 32
	150°C	19 - 28
	170°C	17 - 26
	200°C	15 – 22
Automatski pod Praškom	80°C	23 – 34
	100°C	21 - 31
	120°C	19 - 29
	150°C	18 - 25
	170°C	16 - 23
	200°C	13 – 20

Unos toplote kod ručnog električnog zavarivanja suočenih spojeva:

S obzirom na izabranu temperaturu predgrejavanja i unos toplote, zavarivanje se kod ručnog električnog postupka može izvoditi sa izvučenim dužinama to je ona dužina vara koja se mora zavariti sa jednom elektrodom određene dužine i pomera i sa određenim parametrima koje su priključene u tabeli 5.6. Izvučene dužine su izračunate po formuli:

$$s = \frac{U \cdot I \cdot t}{Q} \quad (5.1)$$

S - izvlačna dužina cm

U - napon luka V

I - Jačina struje A

t - vreme sagorevanja jedne elektrode sa ostatkom 50 mm sek

Q - unos topline KJ

Predloženo je da se kod zavarivanja što više upotrebljavaju srednje vrednosti izvlačnih dužina. Kod izbora parametara zavarivanja i iz računa izvlačnih dužina nije uzet u obzir pad napona u kablovima koji može iznositi najviše 2V. Izvlačne dužine su računane sa parametrima koji su naredni kod zavarivačkog pištolja. Temperatura predgrejavanja je od 80°C-200°C, a dozvoljeni unos toplote 15-38 KJ i elektrode prečnika \varnothing 3,2 i dužine 350 mm i prečnika \varnothing 4,0 i dužine 400 mm.

Tabela 5.6 Parametri kod ručnog električnog zavarivanja suočenih spojeva:

\varnothing elektrode	I	U	t	Izvlačna dužina	Srednja vrednost
mm	A	V	sek	Cm	
3,2	91	21	80	5,5 - 8,0	6,7
	98	21-22	75	5,7 - 8,3	7
	105	22	75	6,2 - 9,1	7,6
	112	23	70	6,5 - 9,4	7,9
	120	23	60	5,9 - 8,7	7,3
	128	23-25	60	6,6 - 9,7	8,1
4,0	138	23-25	95	11,3 - 16,5	13,9
	148	23-25	90	11,4 - 16,8	14,1
	158	24-26	85	12 - 17,6	14,8
	170	24-26	83	12,6 - 18,5	15,5
	184	24-27	80	13,2 - 19,3	16,2

Unos topline kod EPP zavarivanja suočenih spojeva:

S obzirom na izabranu temperaturu predstavljanja i unos toplote EPP zavarivanje će se izvoditi sa brzinom zavarivanja koje su s obzirom na parametre zavarivanja prikazane u Tabeli 5.7. Brzina zavarivanja je izračunata po formuli:

$$s = \frac{U \cdot I \cdot 60}{Q} \text{ [cm/min]} \quad (5.2)$$

V - brzina zavarivanja [cm/min]

U - napon luka [V]

I - jačina struje [A]

Q - unos toplote [kJ]

Predloženo je da se kod zagrevanja što više upotrebljavaju srednje vrednosti za brzinu zavarivanja, a brzine zavarivanja ispod 25 cm/min treba izbegavati. Temperatura predgrevanja je od 80°C-200°C, a dozvoljeni unos toplote 13 - 34 KJ.

Tabela 5.7 Parametri kod EPP zavarivanja sušeonih spojeva:

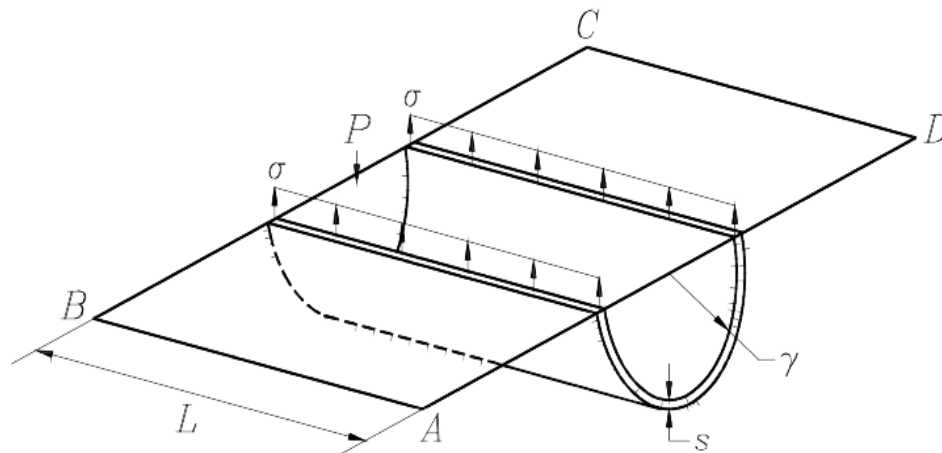
I	U	V /brzina zavarivanja/	Srednja vrednost
A	V	cm/min	
440	28	30 - 41	35
480	28	32,5 - 44,5	38
500	30	36 - 50	43
540	30	39 - 54	46
560	32	43 - 59,5	51
600	32	46 - 64	55
640	32	49 - 68	58
680	32	52,5 - 72, 5	62
680	34	55,5 - 77	66

5.3 PRORAČUN DEBLJINE ZIDA CEVOVODA NA DEJSTVO STATIČKOG PRITISKA

U ovom poglavlju biće prikazan statički proračun cevovoda za potrebnu debljinu zida sa aspekta čvrstoće. Ono što će biti razmatrano jeste proračun za različite stepene sigurnosti. Iz razloga što je projektovani stepen sigurnosti pri projektovanju cevovoda bio 1,7, a u današnje vreme se koristi stepen sigurnosti od 1,5 za cevovode prema standardu EN ISO 13480-3 /5.9/. Takođe ćemo pokazati proračun i za radni pritisak od 90bar.

Ono što još treba napomenuti je da je pri projektovanju cevovoda, a na osnovu karakteristika osnovnog materijala SUMITEN SM80P, zaključeno da je maksimalna moguća projektovana bila za ovaj materijal iznosila 47mm, koja je kasnije i usvojena. Standard po kome će je proračun rađen jeste EN ISO 13480-3 /5.9/.

Prvo od čega treba da krenemo jeste od dimenzija cevovoda i osnovnog materijala, a dimenzije cevovoda u ovom slučaju su **Cev Ø4200,0 x 47,0 mm i osnovni materijal SUMITEN SM80P**. U tabeli 4.8 se nalaze ulazni podaci koji su potrebni za proračun cevovoda prema standardu, ali podaci koji će se menjati jesu stepen sigurnosti od 1,5 i 1,7 i proračunski pritisak od 90bar, a karakteristike poprečnog preseka su date na slici 5.3.



Slika 5.3. Presek cevovoda sa karakteristikama poprečnog preseka

Tabela 5.8 Ulazni podaci za proračun cevovoda

Polazni i usvojeni podaci, oznake i geometrija		
$D_o = 4200,0$	mm	spoljašnji prečnik cevi
$e_n = 47,0$	mm	nazivna debljina (na crtežima)
$D_i = 4106,0$	Mm	unutrašnji prečnik cevi ($D_i = D_o - 2 \cdot e_n$)
$p_c = 9,02$	MPa	Proračunski pritisak,
$t_c = 20,0$	°C	Proračunska temperatura,
$K = 700,0$	N/mm ²	Proračunska čvrstoća materijala cevi na proračunskoj temperaturi,
$S = 1.5$ i 1.7	-	Stepen sigurnosti materijala pri proračunskoj temperaturi,
$f = K/S$	N/mm ²	Projektni napon materijala cevi na proračunskoj temperaturi,
$z = 1,00$	-	Koeficijent valjanosti zavarenog spoja,
$C_1 = 0,50$	Mm	Dodatak za dozvoljeno odstupanje debljine zida cevi (tolerancija u minusu),
$C_0 = 1,0$	Mm	Dodatak zbog smanjenja debljine zida korozijom i erozijom.
$C_2 = 0$	Mm	Dodatak zbog mogućeg stanjenja u toku procesa proizvodnje

Uslovi pod kojima važi proračun su:

$$\frac{D_o}{D_i} \leq 1.7, \text{ a to je u ovom slučaju } \frac{4200}{4106} = 1.023 \leq 1.7 \quad (5.3)$$

Proračun minimalne debljine cevi se računa po sledećoj formi:

1) Zahtevana debljina bez dodataka

$$e = \frac{p_c \cdot D_0}{2 \cdot f \cdot Z + p_c} [\text{mm}] \quad (5.4)$$

2) Zahtevana debljina sa dodacima iz tabele 4.8 c_1 , c_2 i c_0 :

$$e = e + c_0 + c_1 + c_2 \quad (5.5)$$

Ono što treba napomenuti je da u formuli 4.4 ubacujemo projektni napon materijala f , koji se prema tabeli 5.8 računa kao odnos proračunske čvrstoće K i stepena sigurnosti S . Veoma je važno uočiti ovo pošto je to bitan faktor gde stepen sigurnosti utiče na projektovanu debljinu.

Dobijene vrednosti minimalne potrebne debljine zida cevi (dobijeni kada se ulazni podaci iz tabele 5.8 uvrste u formule 5.4 i 5.5) biće prikane u tabeli 5.9.

Tabela 5.9 Proračunska debljina zida cevovoda:

Proračunski pritisci P	Stepen sigurnosti	Zahtevana debljina bez dodatka e [mm]	Zahtevana debljina sa dodatkom e_r [mm]
Proračunski pritisak 9,02MPa	Stepen sigurnosti 1.5	40,11	41,61
	Stepen sigurnosti 1.7	45,40	46,90

Na osnovu statičkog proračunskog pritiska minimalne potrebne debljine prema evrpskoj direktivi za opremu pod pritiskom EN PED 14/68 /5.10/, možemo zaključiti da nazivna debljina cevovoda od 47 mm zadovoljava kriterijume stepena sigurnosti i radnog pritiska od 9,02MPa. Svakako radi održavanja stabilnog integriteta konstrukcija tokom redovnog remonta treba proveravati debljine zida cevovoda i proveriti da li ta debljina zadovoljava stepen sigurnosti prema PED direktivi /5.10/.

6. EKSPERIMENTALNI DEO

Imajući u vidu cilj ove teze da se analizira naponsko-deformaciono stanje i integritet cevovoda HE „Bajina Bašta“ na osnovu ispitivanja prototipa, u ovom poglavlju je dat detaljan opis prototipa i njegovog ispitivanja, na osnovu prikaza u /2.4-2.5/.

6.1 OPIS ISPITANOG PROTOTIPA

Model, koji predstavlja najopterećeniji deo cevovoda, prikazan je na slici 5.2, odgovara preseku 3-3 (slika 4.2). Cilindrični omotač, prečnika 4200 mm, konstruisan sa kolenom od 5° koje odgovara prelaznom komadu u cevovodu, zatvoren je sa dva oblikovana stanca. Korišćeni su postupci ručnog elektrolučnog zavarivanja (E) i zavarivanja pod praškom (EPP) /2.4-2.5/.

Osobine zavarenih spojeva čeličnog suda pod pritiskom proučavane su na prototipu cevovoda reverzibilne hidroelektrane “Bajina Bašta”, koji je izvela fabrika opreme i metalnih konstrukcija “Goša” iz Smederevske Palanke. Prototip je izradjen u cilju dobijanja što potpunije slike o sigurnosti zavarenih spojeva nisko legiranog čelika povišene čvrstoće oznake Sumiten 80P (SM80P) japanske železare “Sumitomo”. Ovaj čelik se koristi za izvodjenje najopterećenijeg dela cevovoda RHE “Bajina Bašta”. Mala razlika između nazivne granice tečenja $R_{0.2} = 686,7$ MPa i zatezne čvrstoće $R_m = 784,8$ MPa ukazuje na malu rezervu plastičnosti, što je posebno izraženo na mestima na kojima može doći do lokalnih plastičnih deformacija osnovnog materijala i šavova. Usvajanjem pri projektovanju visokog radnog napona u cevovodu (404 MPa) dobijen je stepen sigurnosti $S=1,7$ u odnosu na granicu tečenja $R_{0.2}$. Evropska preporuka za stepen sigurnosti za cevovode je $S=1,7$ a japanska $S=2,1$. Relativno mala veličina stepena sigurnosti n je jedan od osnovnih razloga zašto je urađena obimna provera opšte sigurnosti konstrukcije cevovoda na prototipu /2.5/.

Situacija u kojoj je pri upotrebi čelika japanskog proizvođača primenjen projektni stepen sigurnosti niži od preporuke iz Japana zahtevala je izvođenje i kontrolu zavarenih spojeva prototipa cevovoda. Sprovedena su brojna ispitivanja sa ciljem da se dobije dovoljna pouzdanost neophodna za izvodjenje cevovoda, s obzirom da bi posledice, ako bi došlo do eventualnog loma, bile katastrofalne.

Hidrostatski ispitivanje prototipa, delovanjem odgovarajućeg pritiska vode, izvedeno je u uslovima maksimalnih radnih napona i u uslovima njihovog prekoračenja za 33%. Nakon hidrostatskog ispitivanja iz prototipa su isečene odgovarajuće probe i izvedena su različita ispitivanja sa ciljem da se uporede rezultati sa rezultatima dobijenim na probama koje nisu pretrpele opterećenje i da se na taj način oceni efekat preopterećenja i početnih plastičnih deformacija. Izvedena su statička ispitivanja i ispitivanja u uslovima brzog razvoja loma.

Prototip je izradjen od šest limova debljine 47 mm iz dve konvertorske šarže čelika Sumiten 80P (SM80P), vakuumski obrađene i livene u ingote. Hemijski sastav i mehaničke osobine limova dati su u tabeli 6.1/2.3/

Tabela 6.1. Hemijski sastav i mehaničke osobine limova i dodatnog metala /2.3/

Materijal	Hemijski sastav, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	B
SM80P											
Lim A	0,10	0,30	0,90	0,11	0,008	0,24	0,48	1,01	0,47	0,03	0,0016
Lim B	0,12	0,27	0,87	0,011	0,007	0,27	0,47	0,99	0,45	0,03	0,0012
DM*(R**)	0,06	0,53	1,48	0,011	0,005		0,24	1,80	0,43		
DM(A***)	0,07	0,37	1,87	0,01	0,011		0,44	0,13	0,73		
Materijal	Mehaničke osobine										
	SM80P	Pravac	Zatezne karakteristike			Žilavost					
			R _{0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %	Šarpi V, J	°C				
Lim A	Uzdužno	755-794	804-834	24-29	156-223	-40					
	Poprečno	755-794	795-834	22-23	60-147	-40					
Lim B	Uzdužno	775-795	824-844	25-26	216-237	-40					
	Poprečno	775-804	824-853	19-23	83-121	-40					
DM (R)		722	810	23	99	-5					
DM (A)		687	804	23	78	-18					

* DM – dodatni metal,

** R – ručno zavarivanje

*** A – automatsko zavarivanje.

Ekvivalentni sadržaj ugljenika računat je prema formuli:

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (6.1)$$

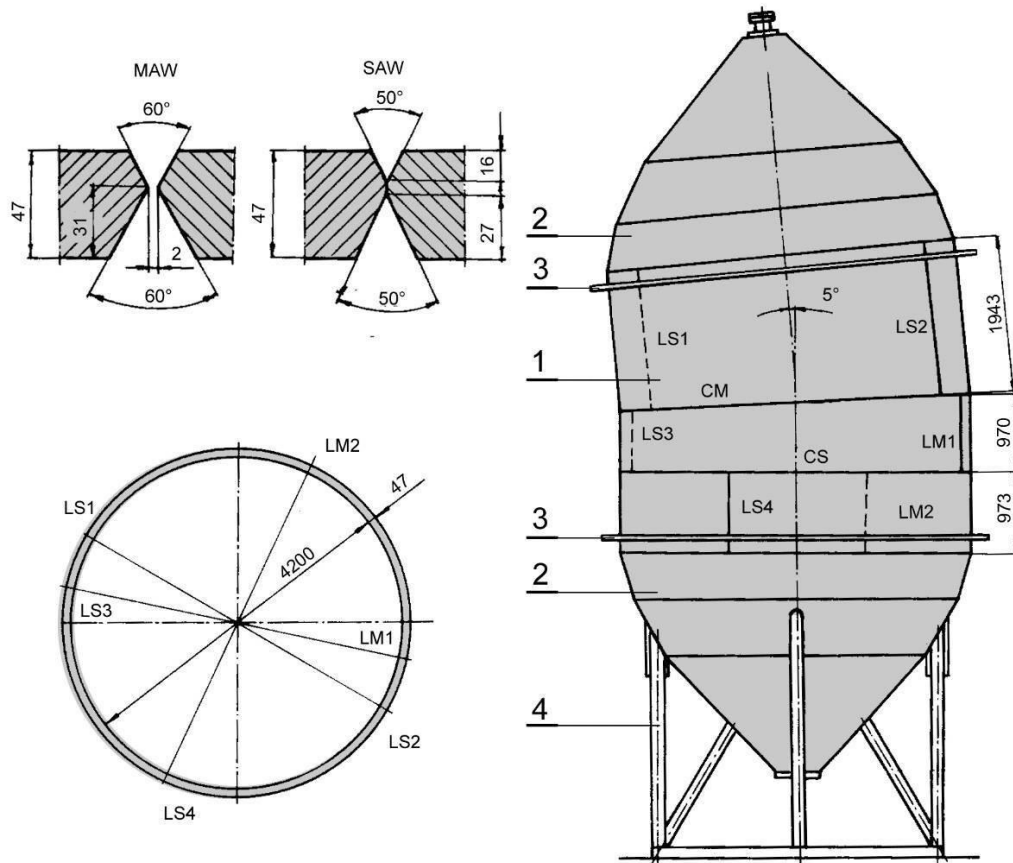
pa se dobija za limove A: $C_{eq}=0,50$ i za limove B: $C_{eq}=0,51$.

Iz tabele 6.1 se vidi da je u pitanju kompleksno legiran niskougljenični čelik sa izraženom anizotropijom koja varira od lima do lima.

Konstrukcija prototipa (slike 6.1) izvedena je tako da su uzeti oblik, mere i debljina zida na najopterećenijem delu cevovoda (prečnik $d = 4,2$ m, koleno pod uglom 5° , debljina zida $s = 47$ mm). Da bi se smanjio uticaj danca na oba kraja omotača postavljena su rebra za ojačanje. Ploče su savijane na hladno, a ivice pripremljene gasnim rezanjem i brušenjem.

Prototip obuhvata sve kombinacije položaja zavarenih spojeva i postupaka zavarivanja koji se primenjuju na cevovodu. Tehnologija zavarivanja prototipa odgovara tehnologiji zavarivanja cevovoda. Prototip se sastoji iz tri prstena, izvedena pomoću četiri uzdužna automatski zavarena šava (LS1, LS2, LS3 i LS4) i dva uzdužna ručno zavarena šava (LM 1 i LM2), a spajanje prstenova je izvedeno jednim kružnim ručno zavarenim šavom (CM) i jednim automatski zavarenim šavom (CS). Popravke šavova izvedene su ručno /2.4/.

Unete količine toplote kod automatski zavarenih šavova iznose 1,5 – 4,8 MJ/m, kod ručno zavarenih šavova 0,5 – 1,85 MJ/m. Tehnologija zavarivanja predviđa odgovarajuće predgrevanje, kontrolisanu temperaturu medjuprolaza i odgovarajuće vreme zadržavanja zavarenog spoja na određenoj temperaturi.



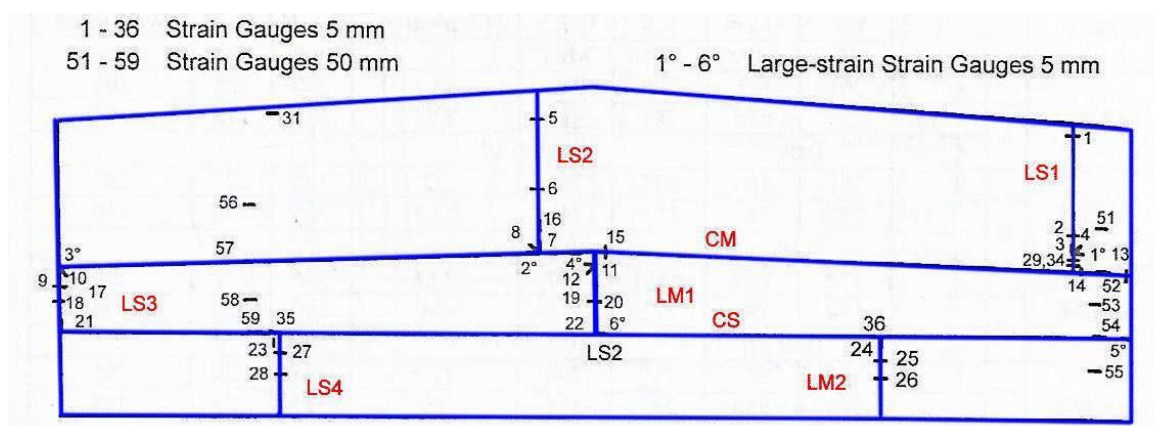
Slika. 6.1 Konstrukcija i dimenzije prototipa cevovoda /6.1/.

6.2. ISPITIVANJE PROTOTIPA

Hidrostatski ispitivanje prototipa izvedeno je u krugu fabrike opreme i metalnih konstrukcija, industrije “Goša” u Smederevskoj Palanci, pri temperaturi okoline između -3°C i 6°C , /2.5/. Deformacije prototipa praćene su mernim trakama, moare mrežama i akustičnom emisijom. Na spoljnoj površini prototipa postavljena je 51 merna traka različitih karakteristika i 10 moare mreža, slika 6.3. Merne trake postavljene na unutrašnjoj strani suda nisu radile zbog greške u mernom sistemu/2.4/.

Hidrostatski ispitivanje prototipa izvedeno je u tri etape i to:

1. Provera mernog sistema povećavanjem unutrašnjeg pritiska u prototipu od 0 do 2,95 MPa i rasterećivanje.
2. Opterećivanje prototipa do nivoa radnih napona povećavanjem unutrašnjeg pritiska od 0 do 9 MPa i rasterećivanje.
3. Preopterećivanje prototipa za 30% u odnosu na radne napone (simulacija vodenog čekića), povećavanjem pritiska od 0 do 12,05 MPa i rasterećivanje.



Slika. 6.2. Raspored mernih mesta na razvijenom omotaču prototipa /6.1/

U tabeli 6.2. dat je plan opterećivanja prototipa u toku hidrostatskog ispitivanja.

Tabela 6.2. Plan opterećivanja prototipa i merenja deformacija u toku hidrostatskog ispitivanja

Prvi dan		Drugi dan		Treći dan	
Vreme	Pritisak [MPa]	Vreme	Pritisak [MPa]	Vreme	Pritisak [MPa]
		10:36	0	13:30	0
		10:45	0,50	13:54	0,50
		11:55	2,95	14:35	2,95
		14:00	4,40	14:57	2,95
		14:40	5,90	16:17	7,35
		15:22	7,35	16:54	9,00
16:50	0,50	17:00	7,35	17:24	9,80
17:36	2,45	17:37	8,35	18:08	10,80
17:50	2,95	18:01	8,35	18:45	11,50
19:05	0,50	18:14	9,00	19:17	12,05
		19:25	9,00	20:08	12,05
		20:20	0,50	20:15	10,80
				20:30	9,00
				20:40	7,35
				20:57	2,95
				21:22	0,50

U trećoj etapi ispitivanja unutrašnji pritisak vode je povećan do 12,05 MPa kada je dostignut računski napon u pravcu obima $\sigma_t = 532,4$ MPa, što odgovara veličini od 77,5% nazivnog napona na granici tečenja (686, 7 MPa). Izmerene deformacije pri tom pritisku bile su značajne, a akustična emisija je pokazivala izraženu aktivnost, pa se sa daljim opterećivanjem prototipa nije išlo.

6.3. ANALIZA DEFORMACIJA I NAPONA NA PROTOTIPU

6.3.1. Formule za homogeni oblik suda

Da bi se ocenilo ponašanje pri opterećenju prototipa potrebno je da se izračunaju naponi i deformacije na unutrašnjoj i spoljnoj površini prema poznatim izrazima. Merne trake postavljene na spoljnoj površini prototipa analizirajuće deformacije i naponi na spoljnoj površini. Deformacije i naponi na unutrašnjoj strani će neznatno odstupati od onih na spoljnoj, jer se prototip može smatrati tankozidnim sudom, s obzirom na odnos $s/d = 0,047/4,2 = 0,01$.

Za spoljnu površinu prototipa, zanemarujući dejstvo napona savijanja zida, važe sledeći izrazi za cilindar pod unutrašnjim pritiskom, p , u elastičnom području deformisanja:

a) za napone u obimnom, aksijalnom i radijalnom smeru:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= p \frac{2d^2}{D^2 - d^2} \\ \sigma_t &= p \frac{d^2}{D^2 - d^2} \\ \sigma_r &= 0\end{aligned}\quad (6.2)$$

b) za deformacije u obimnom, aksijalnom i radijalnom pravcu:

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{1}{E}(\sigma_t - \nu\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_t) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_t + \sigma_z)\end{aligned}\quad (6.3)$$

Gde su:

- σ_t , σ_z , σ_r , ε_t , ε_z i ε_r - naponi i deformacije u obimnom, aksijalnom i radijalnom pravcu.
- $D = 4,294$ m- spoljni prečnik prototipa,
- $d = 4,2$ m- unutrašnji prečnik prototipa,
- $E = 210$ GPa- modul elastičnosti
- $\nu = 0,3$ - Poasonov koeficijent.

Unošenjem poznatih vrednosti u izraze (6.2) i (6.3) dobijaju se zavisnosti napona i deformacija od unutrašnjeg pritiska u obliku:

a) za napone (pritisk u MPa)

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 44,186 \cdot p \\ \sigma_z &= 22,093 \cdot p \\ \sigma_r &= 0\end{aligned}\tag{6.4}$$

b) za deformacije (pritisk u MPa)

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= 178,85 \cdot 10^{-6} \cdot p \\ \varepsilon_z &= 42,08 \cdot 10^{-6} \cdot p \\ \varepsilon_r &= -94,68 \cdot 10^{-6} \cdot p\end{aligned}\tag{6.5}$$

Izrazi (6.4) i (6.5), važe za prototip izradjen od izotropnog materijala, ne uzimajući u obzir koncentraciju napona i deformacija usled geometrijskog oblika (koleno, danca, rebra za ojačanje) i zaostalih tehnoloških napona (valjanje, savijanje i zavarivanje limova).

Dalja analiza napona uslovljava da se na osnovu hipoteze Mizes-a odredi uporedni napon σ_i koji za $\sigma_r = 0$ dobija oblik:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_t \sigma_z + \sigma_z^2}\tag{6.6}$$

Ako se u izraz (6.6) unesu zavisnosti (6.4) dobija se promena uporednog napona sa unutrašnjim pritiskom

$$\sigma_i = 28,266 \cdot p\tag{6.7}$$

Uporedna deformacija ε_i se računa iz izraza

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_t)^2}\tag{6.8}$$

koji nakon unošenja datih vrednosti i sredjivanja dobija oblik

$$\varepsilon_i = 182,22 \cdot 10^{-6} \cdot p\tag{6.9}$$

Pritisak je u izrazu 6.9 je dat u MPa.

Raspodela deformacija i napona za elastično ponašanje idealnog prototipa, na spoljnoj površini, predstavljena je tabelarno u zavisnosti od unutrašnjeg pritiska p .

Tabela 6.3 Raspodela deformacija i napona na spoljnoj površini idealnog prototipa

Pritisak p MPa	Deformacije $\times 10^{-6}$			Naponi, MPa		
	ε_t	ε_z	ε_i	σ_t	σ_z	σ_i
0	0	0	0	0	0	0
0,50	89	21	91	22,0	11,0	19,1
2,95	527	124	538	130,4	65,2	112,8
4,40	787	185	802	194,4	97,2	168,4
5,90	1055	248	1075	262,9	131,4	227,7
7,35	1315	309	1339	324,8	162,4	281,3
8,35	1493	351	1522	369,0	184,5	319,6
9,00	1610	379	1640	397,7	198,8	344,4
9,80	1753	412	1786	433,0	216,5	375,0
10,80	1932	454	1968	477,2	238,6	413,3
11,50	2057	484	2096	508,1	254,0	440,0
12,05	2155	507	2196	532,4	266,2	461,1

Eliminacijom parametra p u izrazima (6.4) i (6.5) dobija se zavisnost napona i odgovarajuće deformacije u obliku

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 247,05 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_t \\ \sigma_z &= 525,02 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_z\end{aligned}\quad (6.10)$$

Hukov zakon za elastično područje opterećevanja ima oblik

$$\sigma_i = 210 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_i \quad (6.11)$$

Slično se, iz 6.10 mogu odrediti odgovarajući fiktivni moduli elastičnosti, $E_t = 247$ GPa i $E_z = 525$ GPa, koji odražavaju ponašanje idealno izvedenog prototipa od izotropnog materijala, na spoljnoj površini u obimnom i aksijalnom pravcu za slučaj ravnog stanja napona (tankozidni sud).

6.3.2. Izmerene deformacije prototipa pomoću mernih traka

Merne trake su postavljene na spoljnoj površini prototipa prema planu na slici 6.3. Deformacije prototipa praćene su pomoću mernih traka nazvne dužne 5 i 50 mm (oznake 1 – 36 za 5 mm i 51 – 59 za 50 mm). Traka 3 je vezana sa senzorom za pritisak radi praćenja kontinualne promene deformacije sa pritiskom.

Rezultati merenja deformacija u toku hidrostatičkog ispitivanja prototipa biće prikazani tabelama, a za pojedine merne trake i dijagramima. U tabeli 6.4. data je raspodela deformacija

osnovnog metala u obimnom pravcu. Merne trake 30, 31, 32 i 33 priključene su u merni sistem tek u trećoj etapi ispitivanja (povećanje unutrašnjeg pritiska od 0 do 12,05 MPa i rasterećenje), pa su rezultati za njih nepotpuni. S obzrom da je hidrostatičko ispitivanje prototipa izvedeno u cilju proučavanja zavarenih spojeva na cilindričnom delu, nepotpunost ovih podataka ne utiče na opštu sliku ponašanja prototipa.

Izmerene deformacije na osnovnom metalu omotača prototipa odstupaju od izračunatih za idealno izveden prototip od izotropnog materijala (tabela 6.3), zbog zaostalih tehnoloških napona (valjanje i savijanje limova) i uticaja rebara za ojačanje, kolena i danca. Najveće deformacije osnovnog metala omotača izmerene su na mernoj traci 31, koja je u neposrednoj blizini rebra za ojačanje. Najbolje slaganje sa proračunatim deformacijama pokazuje merna traka 51 koja se nalazi u blizini šavova LS1 i CM.

Izmerene deformacije u obimnom pravcu et na uzdužnim i kružnim šavovima date su u tabela 6.5. Deformacije na mernim trakama 1 i 5 su male zbog uticaja rebra za ojačanje. Na šavovima LS1 i CM u drugoj etapi ispitivanja su izmerene najveće ukupne deformacije. Zbog toga su u trećoj etapi ispitivanja uključene merne trake 29 i 34, sa ciljem da se dobju što potpuniji podaci o ponašanju čvora šavova. Obimne deformacije izmerene na mernim trakama 29 i 34 su najveće, i pri pritisku od 12,05 MPa iznose $6561 \cdot 10^{-6}$ i $6576 \cdot 10^{-6}$. Izražene deformacije su rezultat koncentracije napona usled kolena i zaostalih napon od zavarivanja šava CM. Deformacije na mernim trakama 17 i 18 približno su jednake, i nešto su veće nego na mernoj traci 20, što ukazuje da je čvrstoća ručno izvedenog šava LS1 veća od čvrstoće automatski izvedenog šava LS3. Na najnižem prstenu (šavovi LS4 i LM2) izmerene deformacije na mernim trakama 25, 26, 27 i 28 međusobno su dobro saglasne i veće su nego kod srednjeg prstena. Ovakvo ponašanje može da se pripiše uticaju donjeg rebra za ojačanje i zaostalih napona usled zavarivanja.

Obimne deformacije na kružnim šavovima se dobro međusobno slažu, izuzev traka 35 i 36, koje se nalaze na čvorovima kružnog šava CS i uzdužnih šavova LS4 i LM2, i pokazuju znatno veće deformacije u poređenju sa ostalim trakama na kružnim šavovima.

Posle rasterećenja prototipa izmerene su zaostale deformacije usled plastičnog tečenja, kao i zbog preraspodele deformacija usled geometrijskih odstupanja.

Deformacije šavova u aksijalnom pravcu date su u tabeli 6.6. Najveće deformacije su na mernoj traci 24 na šavu LM2, i na mernoj traci 13, koja se nalazi na kružnom šavu CM.

Nakon rasterećivanja sa $p=9$ MPa (druga etapa ispitivanja) izmerene su različite deformacije na svim mernim trakama, što ukazuje na uzajamni uticaj delova zavarenih spojeva na kompletno ponašanje prototipa, kao i uticaj geometrijske koncentracije napona. Osnovni metal, koji apsorbuje glavni deo energije u toku opterećivanja, diktira ponašanje dodatnog metala prilikom rasterećivanja, sprečavajući da se vrati u prvobitno stanje ili čak izazivajući znatne deformacije suprotnog znaka (pritisak). Izmerene deformacije nakon rasterećivanja sabiraju se sa deformacijama u narednoj etapi ispitivanja. Znači da prototip kao celina konzervira neko stanje nakon rasterećivanja (zaostale deformacije i napone) i to je početno stanje za naredno opterećivanje.

Tabela 6.4. Izmerene deformacije osnovnog metala u obimnom pravcu $\epsilon_i \cdot 10^{-6}$

Pritisak MPa	Osnovni metal							
	Omotač					Poklopac		Dance
Traka	51	53	55	56	58	32	33	30
0,00	0	0	0	0	0			
0,50	92	89	101	122	130	-	-	-
2,95	469	593	573	529	650	-	-	-
4,40	682	855	816	761	901	-	-	-
5,90	950	1202	1129	1098	1269	-	-	-
7,35	1287	1616	1556	1560	1730	-	-	-
8,35	1452	1846	1756	1779	1975	-	-	-
9,05	1552	1994	1898	1951	2138	-	-	-
0,50	152	277	296	402	423	-	-	-
0,00	60	188	195	280	293	-	-	-
0,50	149	277	284	369	382	89	89	89
2,95	529	578	729	800	832	315	317	-
7,35	1349	1534	1649	1749	1872	1496	1549	1379
9,00	1645	1879	1994	2133	2243	2022	2117	1973
9,80	1804	2060	2156	2309	2454	3343	35818	3190
10,80	1996	2301	2364	2570	2724	3303	3445	3116
11,50	2148	2484	2522	2784	2932	3274	3415	3083
12,05	2280	2649	2668	2974	3127	3364	3460	3129
12,05	2304	2654	2674	2981	3130	3253	3341	3021
10,80	2106	2413	2456	2747	2882	1999	1969	1788
9,00	1802	2064	2124	2407	2525	1735	1717	1551
7,35	1504	1717	1804	2069	2175	1538	1529	1386
2,95	764	842	979	1251	1290	1007	1016	935
0,50	364	362	549	849	829	786	804	754
0,00	215	273	265	480	447	697	715	665

Tabela 6.5. Izmerene obimne deformacije $\varepsilon_i \cdot 10^{-6}$ na šavovima prototipa

Pritisak, MPa	Udužni šavovi								
	1	1°	2	4°	5	6	17	18	20
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	49	89	119	89	76	105	99	96	109
2,95	233	722	693	431	358	511	655	627	545
4,40	348	1024	1054	614	551	786	920	903	778
5,90	569	1479	1548	929	821	1136	1350	1369	1188
7,35	864	2044	2214	1362	1186	1607	1876	1933	1717
8,35	992	2400	2630	1579	1364	1873	2206	2271	2037
9,05	1078	2684	2948	1713	1494	2073	2457	2533	2247
0,50	382	623	904	397	386	462	600	778	746
0,00	333	445	785	308	310	373	501	682	637
0,50	421	543	862	397	350	462	621	789	757
2,95	583	1115	1409	758	643	896	1154	1286	1195
7,35	1093	2334	2633	1667	1421	1940	2278	2361	2164
9,00	1294	2903	3096	1885	1725	2325	2701	2762	2535
9,80	1383	3193	3419	2140	1830	2524	2970	3030	2775
10,80	1480	3664	3955	2309	1979	2788	3391	3467	3123
11,50	1579	4087	4483	2463	2125	3038	3801	3886	3422
12,05	1657	4484	4928	2591	2248	3254	4181	4265	3680
12,05	1638	4479	5010	2570	2223	3247	4197	4304	3678
10,80	1499	4149	4721	2347	2039	3001	3901	4035	3423
9,00	1349	3719	4315	2057	1812	2673	3531	3679	3099
7,35	1177	3283	3893	1768	1531	2329	3136	3306	2760
2,95	798	2199	2829	1067	977	1489	2154	2377	1940
0,50	595	1574	2218	693	655	1022	1603	1879	1500
0,00	507	1485	2141	604	615	923	1483	1772	1380

Tabela 6.5. Nastavak 1

Pritisak MPa	Uzdužni šavovi					
	25	26	27	28	29	34
0,00	0	0	0	0	0	0
0,50	89	102	98	95	–	–
2,95	644	562	633	559	–	–
4,40	917	796	900	779	–	–
5,90	1349	1194	1359	1161	–	–
7,35	1848	1653	1929	1631	–	–
8,35	2132	1900	2253	1888	–	–
9,05	2336	2082	2510	2078	–	–
0,50	687	748	945	756	–	–
0,00	598	646	847	661	445	445
0,50	687	766	974	787	582	534
2,95	1197	1193	1457	1210	1202	1154
7,35	2813	2637	3018	2643	3071	3026
9,00	3463	3232	3668	3260	3853	3884
9,80	4953	4694	5174	4697	5415	5355
10,80	5117	4824	5439	3826	5785	5740
11,50	5286	4963	6710	4998	6157	6131
12,05	5498	5155	6013	5197	6561	6576
12,05	5466	5117	6014	5167	6526	6529
10,80	4126	3828	4710	3881	5117	5105
9,00	3671	3429	4284	3502	4584	4583
7,35	3290	3112	3930	3195	4121	4125
2,95	2284	2273	2991	2373	2896	2899
0,50	1782	1851	2498	1955	2253	2261
0,00	1693	1731	2371	1829	2116	2172

Tabela 6.5. Nastavak 2

Pritisak MPa	Kružni šavovi				Čvorovi					
	52	54	57	59	2°	3°	5°	6°	35	36
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	89	89	89	89	89	–	89	89	–	–
2,95	652	553	571	654	434	–	614	494	–	–
4,40	952	807	869	960	605	–	904	684	–	–
5,90	1331	1149	1250	1366	888	–	1399	1042	–	–
7,35	1779	1548	1719	1871	1296	–	1936	1535	–	–
8,35	2031	1752	1961	2134	1503	–	2267	1799	–	–
9,05	2199	1892	2129	2302	1632	–	2429	1956	–	–
0,50	277	274	284	464	444	–	633	1959	–	–
0,00	188	185	195	375	355	188	544	502	375	375
0,50	277	274	284	464	444	277	633	591	507	464
2,95	820	739	776	964	800	938	1138	1001	1029	964
7,35	1917	1686	1909	2069	1684	2038	2233	1971	2663	2612
9,00	2314	2014	2304	2469	2004	2263	2648	2333	3394	3368
9,80	2536	2195	2529	2674	2152	2738	2863	2527	4751	4837
10,80	2802	2420	2815	2939	2312	3088	3149	2786	4855	5001
11,50	3004	2594	3036	3144	2452	3438	3397	2996	4943	5166
12,05	3187	2744	3238	3329	2576	3788	3683	3203	5093	5404
12,05	3202	2761	3263	3324	2559	4038	3693	3201	5018	5357
10,80	2938	2536	2996	3069	2340	3738	3373	2961	3659	3890
9,00	2542	2198	2599	2694	2065	3188	2997	2649	3222	3459
7,35	2152	1864	2229	2329	1784	2738	2614	2324	2849	3099
2,95	1162	1022	1265	1381	1087	1513	1661	1538	1842	2121
0,50	627	589	772	886	704	838	1146	1131	1330	1635
0,00	538	500	683	797	615	749	1057	1042	1198	1546

Tabela 6.6. Izmerene deformacije u aksijalnom pravcu ε_z , $\mu\text{m/m}$ na šavovima prototipa

Pritisak MPa	Uzdruzni savovi							Kružni šavovi		
	3	9	11	16	19	23	24	13	14	15
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	44	33	31	21	66	101	21	34	42	28
2,95	275	200	114	34	197	409	175	304	271	40
4,40	403	270	149	24	283	518	187	440	389	29
5,90	610	459	281	102	450	788	307	754	650	87
7,35	890	714	485	259	747	1141	475	1155	961	216
8,35	1007	845	545	286	860	1308	517	1356	1118	223
9,05	1083	948	581	312	923	1421	545	1498	1216	232
0,50	278	432	241	241	399	717	327	652	495	165
0,00	234	393	220	220	333	616	306	631	4747	137
0,50	255	460	241	241	446	748	327	757	495	260
2,95	470	599	358	283	614	997	443	1018	726	303
7,35	1044	1017	701	493	1085	2164	1318	1609	1253	508
9,00	1248	1163	896	557	1262	2630	1679	1824	1444	570
9,80	1353	1279	862	568	1317	4157	3003	1970	1560	571
10,80	1461	1393	872	548	1378	4136	2875	2159	1705	527
11,50	1574	1503	903	551	1438	4161	2806	2331	1857	512
12,05	1667	1602	932	556	1506	4257	2821	2491	1986	506
12,05	1617	1571	877	498	1449	4200	2742	2471	1964	446
10,80	1477	1476	795	448	1334	2924	1598	2333	1834	398
9,00	1324	1376	723	431	1227	2627	1415	2170	1696	386
7,35	1144	1259	629	396	1097	2438	1319	1987	1532	360
2,95	720	983	440	339	791	1923	1057	1533	1137	303
0,50	458	809	343	315	627	1681	957	1260	898	277
0,00	437	742	322	294	514	1549	917	1134	877	154

6.3.3. Analiza napona zavarenih spojeva prototipa

Za opterećenje prototipa unutrašnjim pritiskom $p = 12,05$ MPa izračunat je uporedni napon $\sigma_i = 461,1$ MPa (tabela 6.3), što iznosi 61% u odnosu na izmerenu granicu tečenja ugrađenog

osnovnog metala ($\sigma_{0.2} = 755$ MPa), odnosno 67% u odnosu na izmerenu granicu tečenja dodatnog metala automatski izvedenog šava ($\sigma_{0.2} = 687$ MPa, tabela 6.1).

Prisustvo različitih izvora koncentracije napona dovodi do lokalnih plastičnih deformacija. Prema tome, pojedini delovi prototipa ponašaće se proporcionalno i za njih će važiti odgovarajuća raspodela napona, a ostali delovi (šavovi) odstupaće od zakona proporcionalnosti i za njih će važiti nelinearna promena napona sa deformacijom.

Za proporcionalno područje ponašanja prototipa prema standardnom proračunu /6.2/ naponi se mogu izraziti preko izmerenih deformacija u obimnom pravcu ε_t , kao i u aksijalnom, ε_z , pomoću sledećih zavisnosti izvedenih iz izraza za deformacije (7.3):

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_t + \nu\varepsilon_z) \quad (6.12)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_z + \nu\varepsilon_t) \quad (6.13)$$

Uporedni napon σ_i čije se vrednosti upoređuju sa ponašanjem epruvete pri ispitivanju jednoosnim zatezanjem, računa se na osnovu izračunatih vrednosti napona σ_t i σ_z pomoću izraza (6.6).

Uporedna deformacija ε_i , nakon sredjivanja izraza (6.8) dobija oblik

$$\varepsilon_i = \frac{1}{1-\nu^2} \sqrt{(1-\nu+\nu^2)(\varepsilon_t^2 + \varepsilon_z^2) - (1-4\nu+\nu^2)\varepsilon_t\varepsilon_z} \quad (6.14)$$

Zamenom poznatih veličina $E = 210$ GPa i $\nu = 0,3$ dobiju se izrazi za izračunavanje napona u obimnom i aksijalnom pravcu i uporedne deformacije, u zavisnosti od izmerenih deformacija na mernim trakama na spoljnoj površini prototipa ε_t i ε_z , u obliku:

$$\sigma_t = 230,77 \cdot 10^9 (\varepsilon_t + 0,3 \cdot \varepsilon_z) \quad (6.15)$$

$$\sigma_z = 230,77 \cdot 10^9 (\varepsilon_z + 0,3 \cdot \varepsilon_t) \quad (6.16)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{0,95 \cdot (\varepsilon_t^2 + \varepsilon_z^2) + 0,13\varepsilon_t\varepsilon_z} \quad (6.17)$$

Na osnovu izraza (6.15), (6.16), (6.17) i (6.6) računaju se naponi σ_t , σ_z i σ_i i uporedna deformacija ε_i za odabrana merna mesta na prototipu. Izrazi (6.15), (6.16) i (6.17) važe samo za proporcionalno ponašanje prototipa, a to je prvi deo u toku opterećivanja. Na mestima gde koncentracija napona ne dolazi do punog izražaja prototip će se ponašati proporcionalno u punom ciklusu opterećivanja i rasterećivanja.

6.3.4 Postupak za analizu napona u području prelaza iz elastičnog u plastično ponašanje

Za delove prototipa koji se ne ponašaju proporcionalno, uporedni napon, σ_i , se računa iz zavisnosti / 5.8/:

$$\sigma_i = A\varepsilon_{ipl}^n \quad (6.18)$$

gde je: A- koeficijent čvrstoće,
 ε_{ipl} - uporedna plastična deformacija,
 n- indeks deformacijskog očvršćavanja.

Promena $\sigma_i - \varepsilon_{ipl}$ dobija se jednoosnim zatezanjem, računajući sa stvarnim naponom izraženim preko trenutnih površina poprečnog preseka epruvete. Na osnovu ovakvog ispitivanja određuju se konstante A i n za odgovarajući materijal.

S obzirom da su prilikom ispitivanja prototipa merene deformacije u obimnom i aksijalnom pravcu u uslovima dvoosnog zatezanja (ravno naponsko stanje) potrebno je da se nelinearna promena napona sa plastičnom deformacijom izvede za odgovarajuće napone. U tom cilju uvodi se parametar odnosa napona u aksijalnom i obimnom pravcu:

$$m = \frac{\sigma_z}{\sigma_t} \quad (6.19)$$

pa se uporedni napon σ_i iz izraza (7.6) može se izraziti u obliku:

$$\sigma_i = \sigma_t \sqrt{1 - m + m^2} \quad (6.20)$$

Za oblast plastičnih deformacija Poasonov koeficijent je $\nu = 0,5$, pa se uporedna plastična deformacija može izraziti u obliku:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{1 - \nu^2} \sqrt{(1 - \nu + \nu^2)(\varepsilon_t^2 + \varepsilon_z^2) - (1 - 4\nu + \nu^2)\varepsilon_t\varepsilon_z} \quad (6.21)$$

Zamenom $\nu = 0,5$ uporedna plastična deformacija dobija oblik:

$$\varepsilon_i = 1,1547 \sqrt{(\varepsilon_t^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_t\varepsilon_z)}$$

gde je:

$$\varepsilon_{ipl} = \varepsilon_i - \varepsilon_{iel}$$

ε_{iel} - je relativno mala u poređenju sa ε_i

σ_i -uporedni napon za dvoosno zatezanje ili stvarni $\varepsilon_i = 1,1547 \sqrt{(\varepsilon_t^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_t\varepsilon_z)}$ napon kod jednoosnog zateznog ispitivanja epruvete,

σ_t - napon u pravcu obima kod dvoosnog zatezanja.

6.3.5 Promena uporednog napona sa deformacijom u oblasti plastičnih deformacija

Na isti način može da se izrazi plastična deformacija u pravcu obima ε_{ipl} , /5.8/

$$\varepsilon_{ipl} \cong \frac{1}{E} (\sigma_t - 0,5\sigma_z) = \frac{\sigma_t}{2E} (2 - m) \quad (6.22)$$

Na osnovu izraza (6.21) i (6.22) dobija se zavisnost izmedju uporedne plastične deformacije ε_{ipl} i plastične deformacije u pravcu obima ε_{ipl} u obliku

$$\varepsilon_{ipl} = \frac{2}{2-m} \sqrt{1-m+m^2} \varepsilon_{ipl} \quad (6.23)$$

Plastična deformacija u pravcu obima dobija se iz dijagrama promene $\sigma_t - \varepsilon_t$ i ona predstavlja razliku izmedju izmerene ukupne deformacije, ε_t , i odgovarajuće deformacije koja odgovara proporcionalnom ponašanju, ε_{tpr} , tj.

$$\varepsilon_{ipl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{tpr} \quad (6.24)$$

Zamenom izraza (6.20) i (6.21) u (6.18) dobija se promena napona u pravcu obima σ_t izražena preko plastične deformacije u pravcu obima, ε_{ipl} , u obliku:

$$\sigma_t = A \left(\frac{2}{2-m} \right)^n \left(1-m+m^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \varepsilon_{ipl}^n \quad (6.25)$$

Na osnovu merenja deformacija kod manjih pritisaka dobiće se linija proporcionalne promene napona i deformacije u obimnom pravcu $\sigma_t - \varepsilon_t$, iz koje će se očitavati odstupanje izmerene deformacije ε_t od one koja odgovara proporcionalnom ponašanju.

Za homogeni cilindar parameter m je konstantan i iznosi $m = 0,5$. Za prototip parameter m je određen za proporcionalno područje, kada se naponi σ_z i σ_t računaju iz izmerenih deformacija pomoću izraza (6.15) i (6.16). Na osnovu analize ponašanja prototipa ustanovljen je promenljiv odnos napona u aksijalnom i obimnom pravcu za različita merna mesta, u zavisnosti od koncentracije napona i deformacija. Kada se izadje iz područja proporcionalnog ponašanja za parametar m se pokazalo da u svakoj tački ima konstantnu vrednost i na taj način je bilo moguće odrediti napone u obimnom i aksijalnom pravcu, kao i uporedni napon, σ_i , i uporednu deformaciju, ε_i , koja se sastoji iz odgovarajuće proporcionalne i plastične deformacije. Greške kod izračunavanja σ_t i σ_i su male zbog spore promene ovih komponenti napona sa deformacijom, a za σ_z je izraženija zbog linearne zavisnosti od parametra m .

Kod analize raspodele napona poznate su granice tečenja $\sigma_{0.2}$ i konstante A i n za svaki šav, na osnovu ispitivanja kasnije isečenih epruveta jednoosnim zatezanjem. Iz izraza (6.20) i (6.18) mogu da se odrede i odgovarajuće granice tečenja za napone σ_t i σ_z .

Promena napona u pravcu obima σ_t sa deformacijom ε_t u oblasti plastičnih deformacija prikazan je postupak određivanja napona u pravcu obima, σ_t , za slučaj postojanja plastičnih deformacija, ε_{ipl} . Za određeni unutrašnji pritisak, p , izmerene su deformacije pomoću mernih traka u obimnom i aksijalnom pravcu, ε_t i ε_z , i na osnovu njih izračunati naponi σ_t i σ_z , prema formulama za proporcionalno ponašanje. Izračunatom naponu σ_t , koji pokazuje da je ovaj napon veći od granice tečenja za napon u pravcu obima, $\sigma_{t0.2}$, što znači da izmerena obimna deformacija, ε_t , obuhvata odgovarajuću proporcionalnu deformaciju, ε_{tpr} i plastičnu deformaciju, ε_{ipl} . Ako se pretpostavi da je napon σ_t jednak naponu na granici tečenja, $\sigma_{t0.2}$, odgovaraće mu plastična

deformacija $\varepsilon_{ipl} = \overline{TR} = \varepsilon_t - \varepsilon_{tpr}$, pa se za poznate konstante A i n može odrediti nova vrednost napona, σ_t , kojoj odgovara tačka S na dijagramu $\sigma_t - \varepsilon_t$. Tački S odgovara plastična deformacija $\varepsilon_{ipl} = \overline{QS}$, sa kojom se iz formule (6.25) dobija nova vrednost za σ_t , kojoj odgovara tačka N . Postupak se ponavlja sve do trenutka dok se ne slože vrednosti za σ_t i ε_t na dijagramu $\sigma_t - \varepsilon_t$.

6.3.6. Analiza napona pri rasterećenju prototipa

Na kraju ciklusa opterećivanja određuju se zaostale plastične deformacije, ε_{tplz} i ε_{zplz} . U dijagramima $\sigma_t - \varepsilon_t$ ($\sigma_z - \varepsilon_z$) povlači se iz tačke koja odgovara naponu i deformaciji za $p = 12,05$ MPa prava paralelna sa linijom proporcionalnog ponašanja i njen presek sa koordinatnom linijom (tačka V) određuje $\varepsilon_{tpl,z}$ i $\varepsilon_{zpl,z}$. Na osnovu grafički određenih zaostalih plastičnih deformacija, ε_{tplz} i ε_{zplz} , računaju se naponi za tok rasterećivanja prototipa gde ponovo važi proporcionalna zavisnost napona i deformacija mogu da se napišu izrazi

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(\varepsilon_t - \varepsilon_{tpl,z}) + \nu (\varepsilon_z - \varepsilon_{zpl,z}) \right] \quad (6.26)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(\varepsilon_z - \varepsilon_{zpl,z}) + \nu (\varepsilon_t - \varepsilon_{tpl,z}) \right] \quad (6.27)$$

Uporedni napon σ_i se računa iz izraza (7.6), a uporedna deformacija se određuje prema izrazu:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{iel} + \varepsilon_{ipl} \quad (6.28)$$

gde je: $\varepsilon_{iel} = \frac{\sigma_i}{E}$ - uporedna elastična deformacija,

ε_{ipl} - uporedna plastična deformacija dobijena iz odgovarajućeg dijagrama $\sigma_i - \varepsilon_i$ povlačenjem sečice paralelno liniji proporcionalne promene napona sa deformacijom, za nivo napona σ_i .

6.4 RASPODELA NAPONA I DEFORMACIJA U OSNOVNOM MATERIJALU PROTOTIPA

Raspodela napona u osnovnom metalu određena je na osnovu izmerenih deformacija u aksijalnom pravcu obima (merna traka 53) i računskih deformacija u aksijalnom pravcu za homogeni cilindar (tabela 6.3). Malo odstupanje obimnih deformacija od računski određenih na ostalim mernim trakama, u osnovnom metalu ukazuje na odgovarajuće odstupanje napona od računskih na tim mestima. Naponi su računati na osnovu izraza (6.15) i (6.6) i dati su u tabeli 6.7.

Koeficijenti koncentracije napona računati su kao odnos napona, izračunatih na osnovu izmerenih deformacija, i napona, izračunatih za homogeni cilindar, odnosno:

$$K_t = \frac{\sigma_{tm}}{\sigma_t}; \quad K_z = \frac{\sigma_{zm}}{\sigma_z}; \quad K_i = \frac{\sigma_{im}}{\sigma_i}, \text{ gde su:}$$

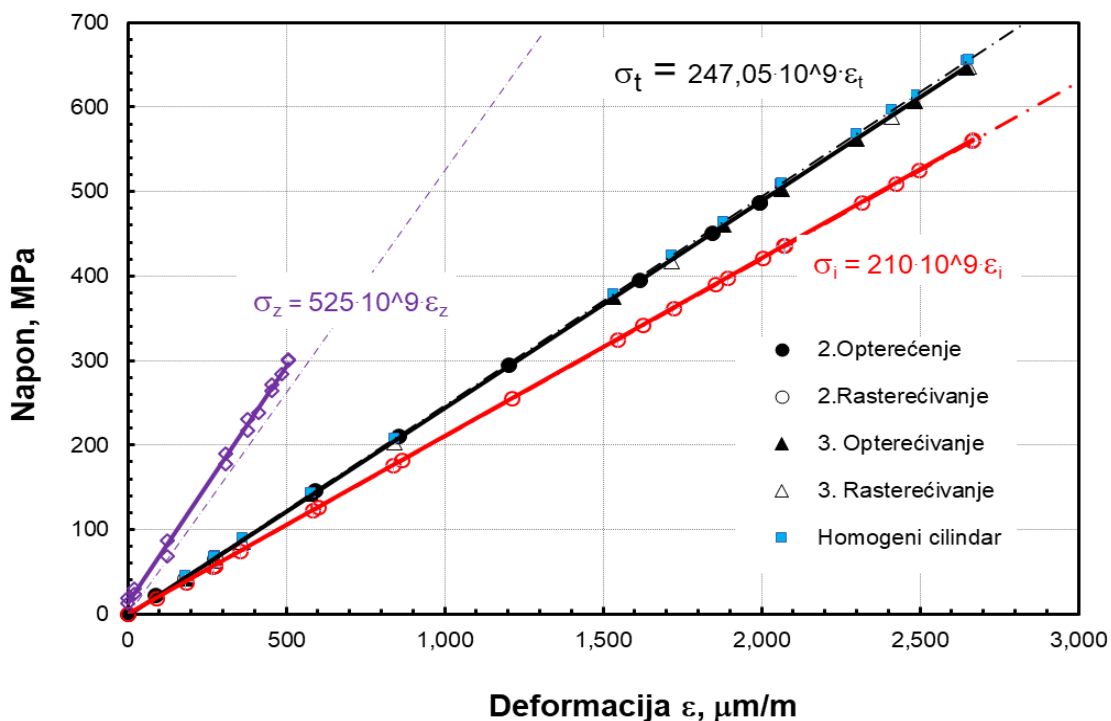
σ_{tm} , σ_{zm} i σ_{im} - naponi izračunati na osnovu izmerenih deformacija ε_t i ε_z

σ_t , σ_z i σ_i - računski naponi za homogeni cilindar (tabela 6.3).

6.5 PRIKAZ REZULTATA U OSNOVNOM MATERIJALU I ZAVARENIM SPOJEVIMA PROTOTIPA

Za šavove prototipa uticaj koncentracije napona je znatno veći, pa će promena napona sa deformacijom odstupati od proporcionalne. Zbog toga je potrebno primeniti formule za nelinearnu promenu napona (6.18). Koeficijent čvrstoće A i indeks deformacionog očvršćavanja n dati su u tabeli 6.8. za šavove prototipa.

Na slici 6.3. predstavljene su promene napona sa deformacijom na osnovu merenja (pune linije) i na osnovu proračuna za homogeni cilindar (isprekidane linije). Vidi se da je promena napona proporcionalna sa deformacijom i da je zanemarljivo odstupanje napona određenog na osnovu izmerene deformacije od računске vrednosti za homogeni cilindar. U toku opterećivanja najveći koeficijent koncentracije napona je $K_t = 1,22$, što ukazuje na srazmerno mali uticaj koncentracije napona usled geometrijskog odstupanja i zaostalih tehnoloških napona (valjanje i savijanje) na ponašanje osnovnog metala. Izračunati zaostali zatezni naponi nakon rasterećivanja iznose $\sigma_{tz} = 63$ MPa, $\sigma_{zz} = 18,9$ MPa i $\sigma_{iz} = 56$ MPa. Oni će se sabirati sa novim radnim naponima za slučaj ponovnog opterećivanja prototipa.



Slika 6.3. Dijagram promene napona osnovnog metala sa deformacijom

Tabela 6.7. Raspodela deformacija i napona osnovnog metala prototipa (merna traka 53)

Pritisak MPa	Deformacija, $\mu\text{m/m}$			Naponi, MPa			Koeficijenti konc. Napona		
	ε_t	ε_z	ε_i	σ_t	σ_z	σ_i	Kt	Kz	Ki
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	89	21	90	22,0	11,0	19,0	1,00	1,00	1,00
2,95	593	124	599	145,4	69,7	126,0	1,12	1,07	1,12
4,40	855	185	865	210,1	101,9	182,0	1,08	1,05	1,08
5,90	1202	248	1212	294,6	140,4	255,2	1,13	1,08	1,13
7,35	1616	309	1624	394,3	183,2	341,8	1,21	1,13	1,22
8,35	1846	351	1854	450,3	208,8	390,3	1,22	1,13	1,22
9,05	1994	379	2003	486,4	225,5	421,6	1,22	1,13	1,22
0,50	277	21	272	65,4	24,0	57,3	-	-	-
0,00	183	0	183	42,2	12,7	37,5	-	-	-
0,50	277	21	272	65,4	24,0	57,3	-	-	-
2,95	578	124	584	142,0	68,6	123,0	1,09	1,05	1,09
7,35	1534	309	1545	375,4	177,5	325,3	1,16	1,09	1,16
9,05	1879	379	1893	459,9	217,5	398,4	1,15	1,09	1,15
9,80	2060	412	2074	503,9	237,7	436,6	1,16	1,10	1,16
10,80	2301	454	2315	562,4	264,1	487,4	1,18	1,11	1,18
11,50	2484	484	2498	606,7	283,7	525,8	1,19	1,12	1,19
12,05	2649	507	2662	646,4	300,4	560,3	1,21	1,13	1,22
12,05	2654	507	2667	647,6	300,7	561,3	1,22	1,13	1,22
10,80	2413	454	2423	588,3	271,8	510,0	1,23	1,14	1,23
9,00	2064	379	2070	502,5	230,4	435,7	1,26	1,16	1,27
7,35	1717	309	1721	417,6	190,2	362,2	1,29	1,17	1,29
2,95	842	124	838	202,9	86,9	176,3	1,56	1,33	1,56
0,50	362	21	355	85,0	29,9	74,7	-	-	-
0,00	273	0	266	63,0	18,9	56,0	-	-	-

Tabela 6.8. Parametri nelinearne promene napona sa deformacijom za šavove prototipa

Šav	Oznaka	Koeficijent čvrstoće A, MPa	Index deformacijskog očvršćavanja N
Uzdužni automatski	LS	1217,2	0,076
Uzdužni ručni	LM	1041,8	0,044
Kružni automatski	CS	1232,0	0,079
Kružni ručni	CM	1029,8	0,047

Tabela 6.9. Raspodela deformacija i napona metala šava LS1prototipa (merne trake 34 i 3)

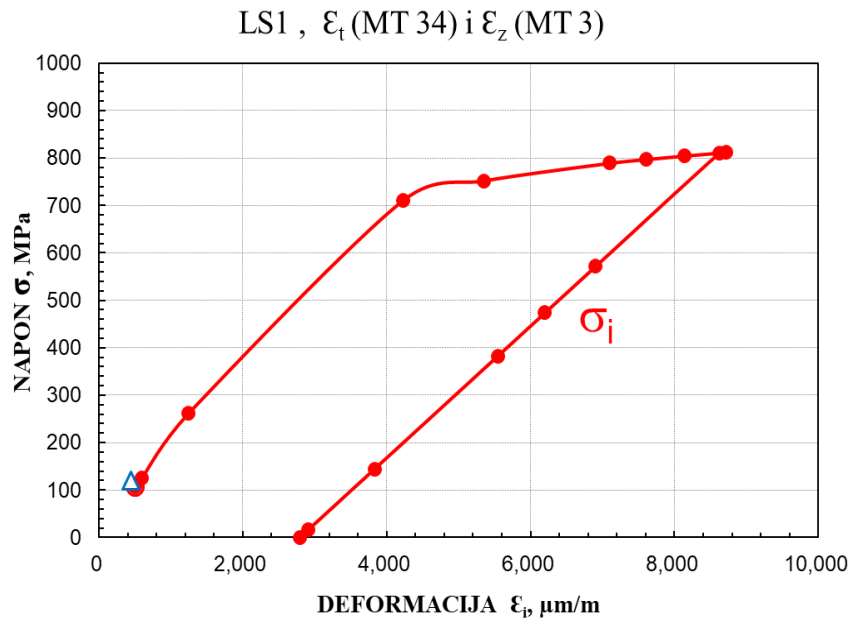
Pritisak MPa	Deformacija, $\mu\text{m}/\text{m}$			Naponi, MPa			Koeficijenti konc. Napona		
	ϵ_t (MT 34)	ϵ_z (MT 3)	ϵ_i	σ_t	σ_z	σ_i	Kt	Kz	Ki
0,00	445	234	505	118,9	84,8	106,0	-	-	-
0,50	534	255	593	140,9	95,8	124,6	-	-	-
2,95	1154	470	1246	298,8	188,4	261,7	2,29	2,89	2,32
7,35	3026	1044	3193	770,6	450,4	670,5	2,37	2,77	2,38
9,00	3883	1248	4064	810,9	405,4	702,3	2,04	2,04	2,04
9,80	5355	1353	5483	872,5	436,2	755,6	2,01	2,01	2,01
10,80	5740	1461	5881	883,9	441,9	765,5	1,85	1,85	1,85
11,50	6131	1574	6285	894,0	447,0	774,2	1,76	1,76	1,76
12,05	6576	1667	6735	904,0	452,0	782,9	1,70	1,70	1,70
12,05	6529	1617	6676	902,8	451,4	781,8	1,70	1,70	1,70
10,80	5105	1477	5286	866,2	433,1	750,1	1,82	1,82	1,82
9,00	4583	1324	4745	714,6	357,3	618,9	1,80	1,80	1,80
7,35	4125	1144	4255	577,5	288,7	500,1	1,78	1,78	1,78
2,95	2899	720	2965	216,1	108,0	187,1	1,66	1,66	1,66
0,50	2261	458	2284	25,4	12,7	22,0	-	-	-
0,00	2172	437	2193	0,0	0,0	0,0	-	-	-

Vidi se proporcionalno ponašanje u drugoj etapi ispitivanja, a nakon rasterećivanja registrovane su zaostale deformacije ($\varepsilon_{tz} = 445 \cdot 10^{-6}$ i $\varepsilon_{zz} = 234 \cdot 10^{-6}$) odnosno odgovarajući zaostali naponi ($\sigma_{tz} = 118,9$ MPa i $\sigma_{zz} = 84,8$ MPa) i oni definišu početno stanje za ispitivanje u trećoj etapi. Zaostali naponi nakon druge etape ispitivanja utiču na to da je u trećoj etapi promena napona sa deformacijom odstupila od proporcionalne kod pritiska nižeg od 9 MPa. Sa daljim povećavanjem pritiska promena brzine deformisanja se povećava, a promena napona ima nelinearan karakter. Za maksimalni pritisak u trećoj etapi ispitivanja izračunat je uporedni napon $\sigma_i = 744,8$ MPa, što je vrlo bliska vrednost granici tečenja za uzdužne automatski izvedene šavove ($\sigma_{i0.2} = 759$ MPa) dobijena na osnovu ispitivanja zateznih karakteristika zavarenih spojeva jednoosnim zatezanjem.

Iz dijagrama $\sigma_t - \varepsilon_t$ i $\sigma_z - \varepsilon_z$ grafičkim putem su određene zaostale plastične deformacije, na način kako je to prethodno opisano, $\varepsilon_{tpl} = 1.220 \cdot 10^{-6}$, na osnovu kojih se prema izrazima (6.25) i (6.26) računaju naponi σ_t i σ_z u toku rasterećivanja. Nakon rasterećivanja izmerene su deformacije na mernoj traci 1° $\varepsilon_t = 1.485 \cdot 10^{-6}$ i na mernoj traci 3 $\varepsilon_z = 437 \cdot 10^{-6}$ što ukazuje na postojanje zaostalih zateznih napona u pravcu obima $\sigma_{tz} = 74,8$ Mpa i u aksijalnom pravcu $\sigma_{zz} = 63,8$ Mpa, kojima odgovara napon $\sigma_{iz} = 70$ Mpa. Izračunati zaostali naponi su manji od zaostalih napona u drugoj etapi ispitivanja usled pretrpljene plastične deformacije. Ovakav postupak snižavanja zaostalih napona često se koristi u praksi i u tom cilju su i standardom definisani probni pritisci veći od radnih, kako bi se povećala sigurnost suda pod pritiskom.

Iz tabele 6.8. uočavaju se veće vrednosti za koeficijent koncentracije napona u aksijalnom pravcu K_z (2,51–2,85) u odnosu na koeficijent koncentracije napona u pravcu obima K_t (1,66–2,29). Izraženi koeficijenti koncentracije napona u aksijalnom pravcu su posledica položaja šava UA 1 na prototipu, koji je pod dejstvom pritiska težio da se „ispravi“, tj. Da dobije oblik cilindričnog suda. Postupak određivanja raspodele napona i deformacija za šav LS1 biće ponovljen na osnovu izmerenih deformacija u pravcu obima na mernoj traci 34, koje su najveće ($\varepsilon_t = 6.576 \cdot 10^{-6}$ za $p = 12,05$ MPa). S obzirom da su merne trake 34 i 29 naknadno uključene u merni sistem, deformacije su praćene samo u trećoj etapi ispitivanja. Stoga je podatak za zaostalu deformaciju iz druge etape ispitivanja uzet sa merne trake 1°. Deformacije u aksijalnom pravcu uzete su sa merne trake 3. Na ovaj način je unesena odgovarajuća greška, svakako relativno mala, s obzirom da nisu primećene nikakve nelogičnosti prilikom proračuna.

Raspodela napona za šav LS1 na osnovu podataka sa mernih traka 34 (ε_t) i 3 (ε_z) data je u tabeli 6.9. i na slici 6.6. Vidi se da je uporedni napon $\sigma_i = 782,9$ za $p = 12,05$ MPa veći od granice tečenja ($\sigma_{i0.2} = 759$ MPa), a nakon rasterećenja javljaju se zaostali pritisni naponi ($\sigma_t = 176,7$ MPa i $\sigma_z = 51,6$ MPa), što će uticati da se kod sledećeg opterećivanja registruju manje deformacije zbog uticaja predopterećenja suprotnog znaka. Koeficijenti koncentracije napona stalno opadaju, što pokazuje da postoji izražena tendencija da prototip dobije oblik cilindričnog suda, odnosno da nakon svakog opterećivanja dolazi do preraspodele zaostalih napona. Za pritiske rasterećivanja ispod $p = 7,35$ MPa izračunavanje koeficijenta koncentracije napona šava gubi smisao zbog dodatnog uticaja elastično deformisanih ploča.



Slika 7.4 Zavisnost napona od ukupne deformacije (Merne trake 34 i 3)

Nakon prikaza rezultata oko zavarenog spoja LS1, gde se nalazi najveća koncentracija napona i zaostale plastične deformacije obratićemo pažnju na zavarene spojeve LS4 i LM2. Ova dva spoja se nalaze na trećem kružnom segmentu prototipa, a važno je što su ova dva vertikalna zavarena spoja rađena različitim tehnologijama zavarivanja. Spoj LS4 je rađen sa EPP postupkom, a spoj LM2 je rađen E postupkom. Poređenjem rezultata ova dva spoja možemo uvideti razlike u ponašanju ZS sa totalno različitim karakteristikama, gde će predstavljati veoma bitan parametar za procenu tehnologije zavarivanja samog cevovoda. Ono što još treba naglasiti da ova dva spoja posle LS1 predstavljaju druga dva kritična mesta sa aspekta deformacija koje smo zaključili u odnosu informacija sa mernih traka 23, 24, 25 i 27.

Najniži prsten prototipa izveden je uzdužnim automatskim šavom LS4 i uzdužnim ručnim šavom LM 2. Prsten ima oblik pravilnog vertikalnog cilindra, pa je i za očekivati da deformacije u obimnom i aksijalnom pravcu budu ravnomerne kod svih mernih traka. Izvesno malo odstupanje između izmerenih deformacija na mernim trakama 25, 26, 27 i 28 u obimnom pravcu je zbog različitog položaja istih u odnosu na rebro za ojačanje.

Uticaj koncentracije napona kolena na šavove LS4 i LM2 je zanemarljiv zbog dovoljne udaljenosti i njihovog povoljnog rasporeda po obimu. Ponašanje šava LS4 praćeno je mernim trakama 27 (ϵ_t) i 23 (ϵ_z), a podaci su dati u tabeli 6.10. Uporedni napon šava LS4 pri najvećem pritisku $\sigma_i = 802$ MPa veći je od granice tečenja $\sigma_{i0.2}$ za uzdužne automatski izvedene šavove ($\sigma_{i0.2} = 759$ MPa) što ukazuje na izraženije plastične deformacije. Koeficijenti koncentracije napona veći su za napone u aksijalnom pravcu Kz, što ukazuje na uticaj zaostalih napona na ispitivanja, $\sigma_i = 798,9$ MPa manji je nego kod šava LS4, što ukazuje na manje plastične deformacije pa su i manji zaostali čvoru šava LS4 i CA. Kod rasterećivanja naponi šava su promenili znak, tako da su na kraju treće etape ispitivanja izračunati zaostali pritiski naponi $\sigma_{tz} = 161$ MPa i $\sigma_{zz} = 138,8$ MPa, kojima odgovara uporedni napon pritiskivanja $\sigma_{iz} = 151,2$ MPa. Očigledan je uticaj osnovnog

metala koji u toku rasterećivanja deo apsorbovane energije utroši na sabijanje metala šava i time ga prednapreže, što će se povoljno odraziti na sledeći ciklus opterećivanja kada će ponovo tečenje biti izazvano na većem pritisku nego u ovom ciklusu. Raspodela napona i deformacija šava LM2 izvedena je na osnovu izmerenih deformacija mernih traka 25 (ϵ_t) i 24 (ϵ_z), a podaci su dati u tabeli 6.11. Uporedni napon za najveći pritisak naponi $\sigma_{zz} = 83,6$ MPa i $\sigma_{iz} = 89,2$ MPa. Koeficijenti koncentracije napona u aksijalnom pravcu i u ovom slučaju su značajni.

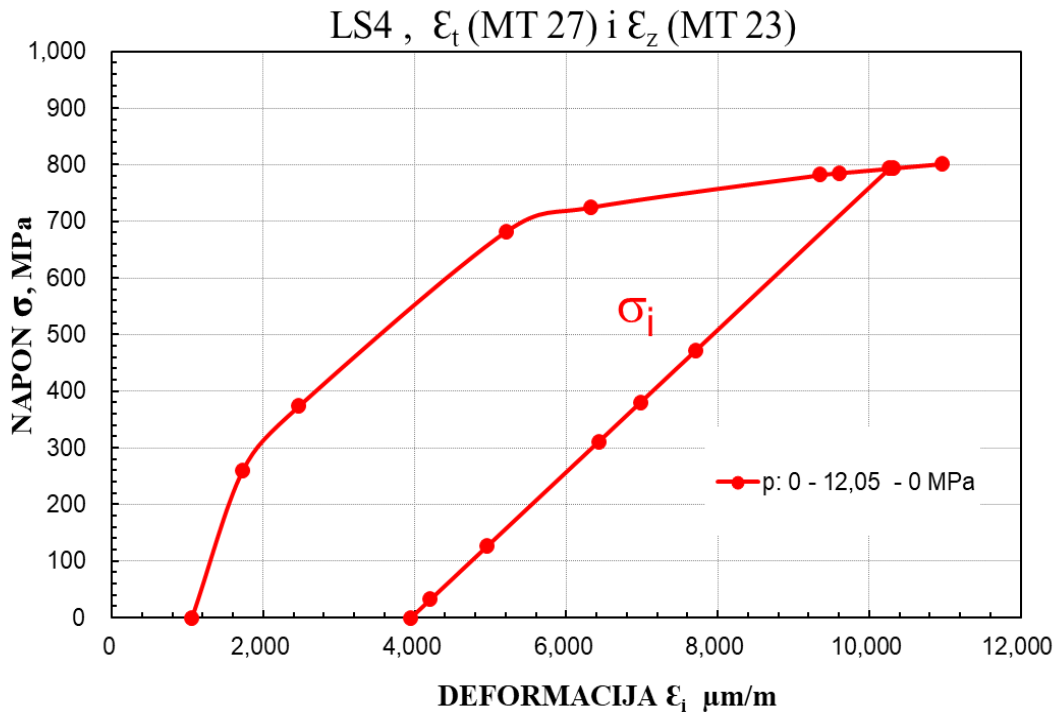
Tabela 6.10. Raspodela napona i deformacija šava LS4 (merne trake 27 i 23)

Pritisak MPa	Deformacija, $\mu\text{m/m}$			Naponi, MPa			Koeficijenti konc. napona		
	ϵ_t (MT 27)	ϵ_z (MT 23)	ϵ_i	σ_t	σ_z	σ_i	K_t	K_z	K_i
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	98	101	142	29,6	30,1	29,9	1,34	2,72	1,56
2,95	633	409	759	174,4	138,2	159,4	1,34	2,12	1,41
4,40	900	518	1044	243,6	181,8	219,3	1,25	1,87	1,30
5,90	1359	788	1580	368,2	275,9	331,8	1,41	2,12	1,47
7,35	1929	1141	2255	524,1	396,9	473,5	1,61	2,44	1,68
8,35	2253	1308	2620	610,5	457,8	550,3	1,65	2,48	1,72
9,05	2510	1421	2900	677,6	501,7	609,0	1,69	2,51	1,76
0,50	945	717	1197	267,7	230,9	251,3	-	-	-
0,00	847	616	1056	238,1	200,8	221,8	-	-	-
0,50	974	748	1239	276,6	240,0	260,2	-	-	-
2,95	1457	997	1779	405,3	330,9	373,7	3,11	5,08	3,31
7,35	3018	2164	3745	846,3	708,3	682,6	2,61	4,36	2,43
9,00	3668	2630	4551	837,4	860,9	725,2	2,11	4,33	2,11
9,80	5174	3157	5699	903,2	1317,5	782,2	2,09	6,09	2,09
10,80	5439	3136	5894	907,3	1331,0	785,7	1,90	5,58	1,90
11,50	6710	3161	5949	926,1	1424,8	802,0	1,82	5,61	1,82
12,05	6013	3257	6428	917,3	1398,7	794,4	1,72	5,25	1,72
12,05	6014	3200	6395	916,7	1385,6	793,9	1,72	5,20	1,72
10,80	4710	2924	5581	550,6	795,9	476,8	1,15	3,34	1,15
9,00	4284	2627	5058	445,1	624,0	385,5	1,12	3,14	1,12
7,35	3930	2438	4656	363,9	514,6	315,1	1,12	3,17	1,12
2,95	2991	1923	3581	147,0	216,5	127,3	1,13	3,32	1,13
0,50	2498	1681	3034	36,6	76,4	31,7	-	-	-
0,00	2371	1549	2853	0,0	0,0	0,0	-	-	-

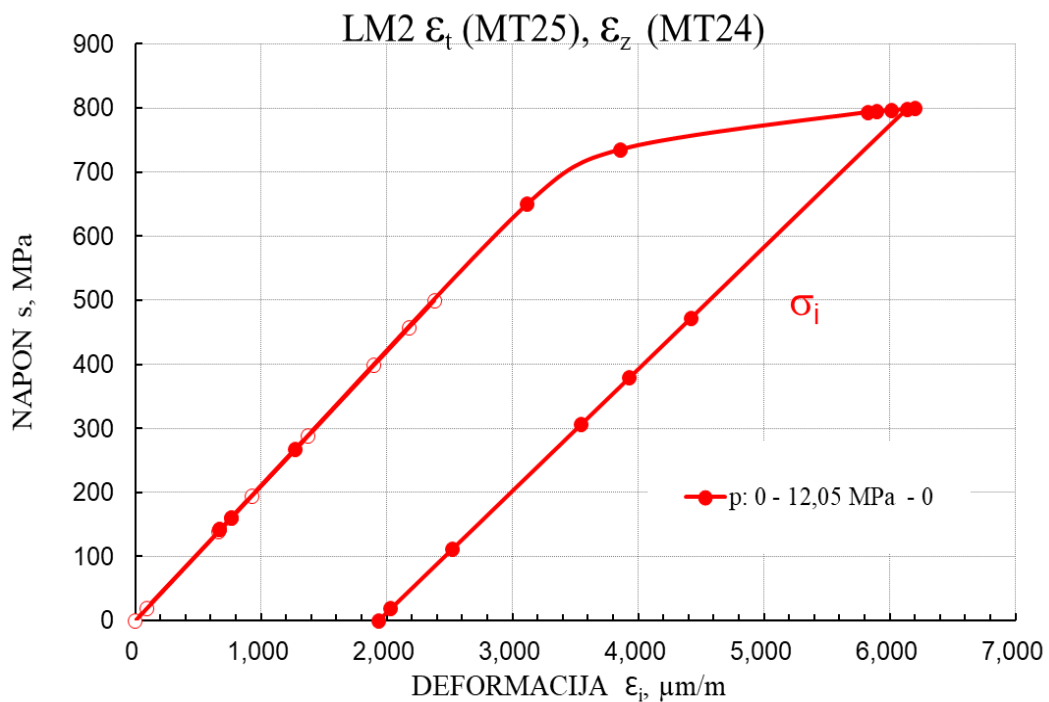
Tabela 6.11. Raspodela napona i deformacija šava LM2 (merne trake 25 i 24)

Pritisak MPa	Deformacija, $\mu\text{m/m}$			Naponi, MPa			Koeficijenti konc. Napona		
	ϵ_t (MT 25)	ϵ_z (MT 24)	ϵ_i	σ_t	σ_z	σ_i	K_t	K_z	K_i
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	89	21	91	22,0	11,0	19,0	1,00	1,00	1,00
2,95	644	175	663	160,7	85,0	139,3	1,23	1,30	1,23
4,40	917	187	926	224,6	106,6	194,6	1,16	1,10	1,16
5,90	1349	307	1371	332,6	164,2	288,0	1,28	1,26	1,28
7,35	1848	475	1895	459,3	237,6	397,9	1,41	1,46	1,41
8,35	2132	517	2177	527,8	266,9	457,1	1,43	1,45	1,43
9,05	2336	545	2379	576,8	287,5	499,5	1,44	1,44	1,44
0,50	687	327	763	181,2	123,0	160,2	-	-	-
0,00	598	306	674	159,2	112,0	141,6	-	-	-
0,50	687	327	763	181,2	123,0	160,2	8,20	11,14	8,37
2,95	1197	443	1275	306,9	185,1	267,7	2,35	2,84	2,37
7,35	2813	1318	3114	749,7	374,8	649,2	2,31	2,31	2,31
9,00	3463	1679	3860	848,7	424,3	735,0	2,13	2,13	2,13
9,80	4953	3003	5829	916,2	458,1	793,4	2,12	2,12	2,12
10,80	5117	2875	5901	917,5	458,7	794,5	1,92	1,92	1,92
11,50	5286	2806	6011	919,4	459,7	796,2	1,81	1,81	1,81
12,05	5498	2821	6204	922,5	461,3	798,9	1,73	1,73	1,73
12,05	5466	2742	6137	921,5	460,7	798,0	1,73	1,73	1,73
10,80	4126	1598	4422	878,9	439,4	761,1	1,84	1,84	1,84
9,00	3671	1415	3931	705,6	352,8	611,0	1,77	1,77	1,77
7,35	3290	1319	3544	568,8	284,4	492,6	1,75	1,75	1,75
2,95	2284	1057	2523	207,7	103,9	179,9	1,59	1,59	1,59
0,50	1782	957	2032	34,5	17,2	29,8	-	-	-
0,00	1693	917	1935	0,0	0,0	0,0	-	-	-

Na dijagramima, slika 6.5 i 6.6, prikazana je zavisnost napona od ukupne deformacije pri opterećivanju i rasterećivanju za unutrašnji pritisak 12,05MPa za zavarene spojeve LS4 i LM2.



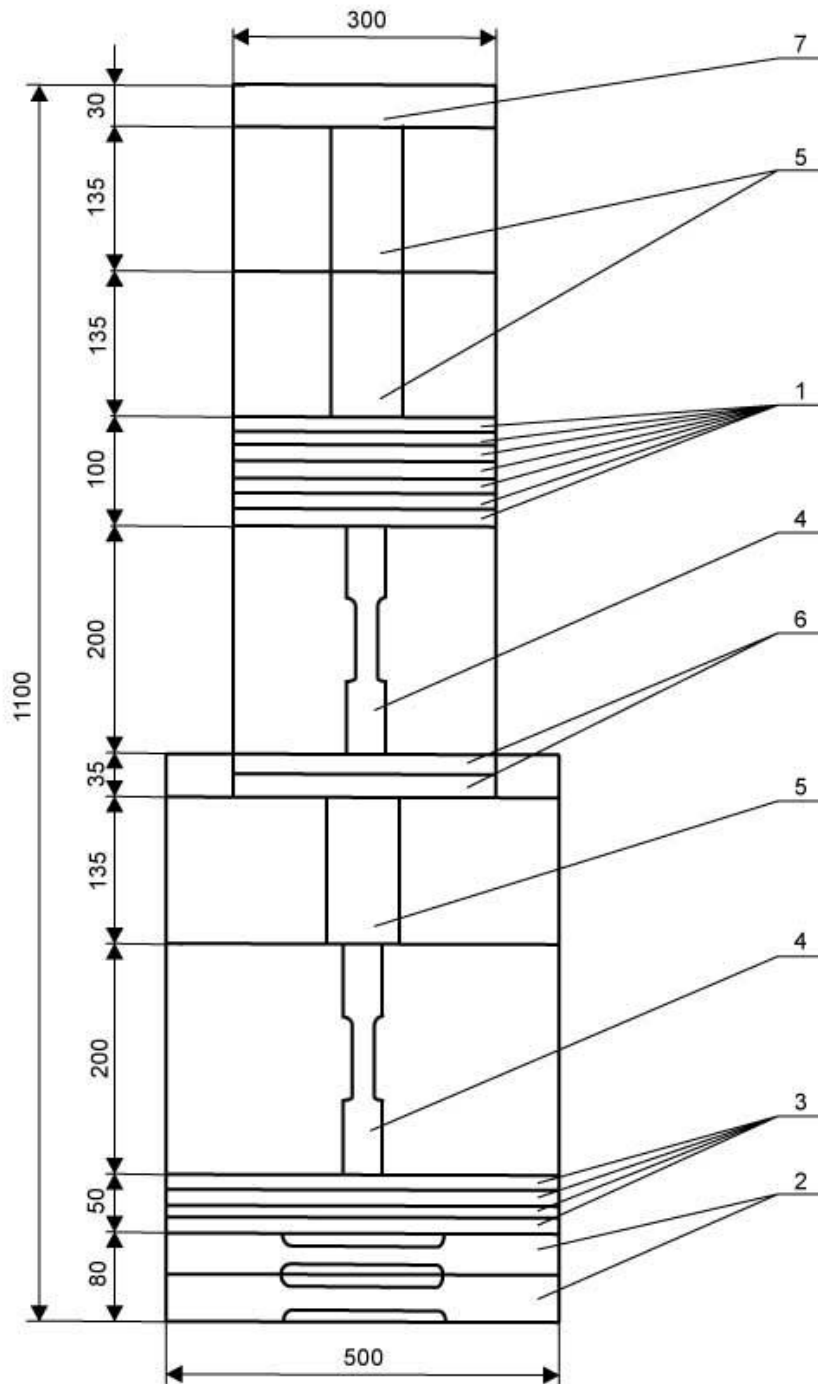
Slika 6.5 Zavisnost napona od ukupne deformacije



Slika 6.6 Zavisnost napona od ukupne deformacije

6.6 MEHANIČKA ISPITIVANJA ISEČENIH EPRUVETA

Paralelno sa zavarivanjem prototipa od istih hladno savijenih limova i pod istim uslovima zavarene su četiri pridružene probe dimenzija 1100 x 500 mm, tako da je iz njih bilo moguće izraditi isti broj epruveta kao i iz zavarenih spojeva prototipa. Svakoj vrsti izvedenog zavarenog spoja odgovara jedna pridružena proba. Plan izrade epruveta iz pridruženih proba dat je na slici 6.7.



Slika 6.7. Plan izrade epruveta sa pridruženih proba

Tabela 6.12. Rezultati ispitivanja zatezanjem epruveta zavarenih spojeva

	Epruveta	Šav	Dimenzije poprečnog preseka	Sila na granici tečenja	Maksimalna sila zatezanja	Granica tečenja	Zatezna čvrstoća	Mesto prekida
			mm	$F_{0,2}$ [KN]	F_m [Kn]	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	σ_m [MPa]	
Pridružene probe	1	LM	46,9 x 21,1	778	840	771	833	ZUT
			47,2 x 21,1	762	830	750	817	ZUT
	2	LS	46,5 x 21,0	764	791	767	795	DM
			46,5 x 21,1	757	792	754	792	DM
3	CS	47,0 x 21,1	770	813	761	804	DM	
		46,8 x 21,1	792	810	787	804	DM	
4	CR	46,9 x 21,0	785	824	782	821	DM	
		46,8 x 21,1	788	828	783	823	DM	
Prototip	5	LM	46,5 x 21,3	811	826	803	818	DM
			46,7 x 21,1	785	816	782	813	ZUT
	6	LS	46,4 x 21,1	748	783	749	785	DM
			46,9 x 21,1	776	794	769	787	DM
7	CM	47,6 x 21,1	775	812	757	793	ZUT	
		47,1 x 21,1	761	806	751	796	DM	
8	CS	46,0 x 21,2	771	798	776	803	DM	
		46,3 x 21,1	758	795	761	799	ZUT	

Zatezne karakteristike zavarenih spojeva prototipa i pridruženih proba ispitivane su prema standardu. Širina originalne epruvete je 25 mm, ali je zbog ograničenih mogućnosti mašine za kidanje 9810 kN smanjena na 21 mm. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika zavarenih spojeva jednoosnim zatezanjem dati su u tabelama 6.12. Dobijene granice tečenja $\sigma_{0,2}$ zavarenih spojeva korišćene su za poređenje sa uporednim naponom σ_i u delu 6.3. Zatezne karakteristike dodatnog metala određivane su prema standardu na epruvetama 6 mm i 12,5 mm, a rezultati ispitivanja dati su u tabeli 6.13.

Tabela 6.13. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika dodatnog metala

	Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete mm	Šav	Granica tečenja, σ_t , MPa	Zatezna Čvrstoća, σ_m , MPa	Izduženje A, %	Kontrakcija S, %
Pridružene probe	1	12,5	LM	796,6	839,7	22,6	67,7
		6,0		752,4	807,4	25,0	66,0
	2	12,5	LS	681,8	771,0	22,0	62,4
		6,0		571,9	807,4	25,0	65,9
Prototip	3	12,5	CA	673,9	755,4	23,4	64,0
		6,0		66,2	769,1	24,2	65,9
	4	12,5	CM	759,3	799,5	22,0	68,6
		6,0		753,4	820,1	27,5	69,7
Prototip	5	12,5	LM	767,1	803,4	22,1	65,7
		6,0		819,1	845,6	24,0	70,1
	6	12,5	LS	672,0	735,8	23,2	63,8
		6,0		705,3	755,4	21,4	66,0
7	12,5	CA	704,4	779,9	25,5	63,6	
	6,0		736,7	776,0	20,7	63,6	
8	12,5	CM	755,4	791,7	20,6	65,1	
	6,0		788,7	818,2	23,3	66,7	

Na uzorcima sa prototipa i pridruženih proba merena je tvrdoća na aparatu Vickers (HV 30). U tabeli 6.14. date su granične vrednosti izmerenih tvrdoća za ZUT i prosečne vrednosti metala šava.

Tabela 6.14. Promena tvrdoće kroz zavarene spojeve

Oznaka epruvete	Šav	Tvrdoća spoja HV		
		ZUT		Metal šava Prosečno
		Max	Min	
1	LM	330	225	265
5		285	228	260
2	LS	335	222	242
6		325	230	240
3	CS	335	232	240
7		330	222	258
4	CM	335	220	265
8		325	225	255

Udarne žilavosti je ispitivana na metalu šava (DM), zoni pod uticajem toplote (ZUT), a na uzorcima sa prototipa i iz osnovnog metala. Na epruvetama iz pridruženih proba ispitivanja su izvedena na temperaturama 20°C, -20°C i -60°C, a na epruvetama sa prototipa na 20°C, 0°C, -20°C, -40°C, -60°C i -80°C. Rashladno sredstvo za ostvarivanje niskih temperatura je tečan azot u alkoholu. Energija loma je pored očitavanja na Amsler klatnu praćena i na osciloskopu, te je bilo moguće razdvojiti je na energiju za stvaranje i energiju za širenje prsline do loma. Ispitivanja su izvedena na uzorcima od po tri epruvete za svaku temperaturu, a prosečne vrednosti udarne žilavosti na različitim temperaturama date su u tabeli 6.15.

Tabela 6.15. Prosečne vrednosti udarne žilavosti pri različitim temperaturama ispitivanja

	Oznaka Epruvete	Šav	Položaj zarez	Udarne žilavost, J/cm ²					
				20°C	0°C	-20°C	-40°C	-60°C	-80°C
Pridružene probe	1	LM	DM	149	/	138	/	83	/
			ZUT	99		118		96	
	2	LS	DM	124	/	73	/	43	/
			ZUT	80		60		36	
	3	CS	DM	116	/	123	/	107	/
			ZUT	112		102		83	
	4	CM	DM	187	/	123	/	107	/
			ZUT	112		102		83	
Prototip	5	LM	DM	172	151	117	114	105	103
			ZUT	254	250	200	226	178	182
	6	LS	DM	106	74	75	63	53	33
			ZUT	233	227	108	232	11	24
	7	CS	DM	82	94	50	57	37	27
			ZUT	73	55	52	43	37	33
	8	CM	DM	168	121	115	90	59	33
			ZUT	127	120	114	124	124	83
	OM		A	128	103	84	77	110	42
			B	118	71	48	32	28	20

Sređivanjem svih rezultata mehaničkih ispitivanja za tip postupaka zavarivanja, SMAW i SAW, prikazana zajedno u tabeli 6.16. Predstavljene su vrednosti napona tečenja (R_e) i zatezne čvrstoće (R_m) zavarenog spoja (ZS) i metala šava (MŠ), kao i izduženje (A) metala šava i tvrdoća zavarenog spoja, za ukupno 8 ispitnih uzoraka.

Tabela 6.16 Mehaničke karakteristike ispitanih uzoraka

Tip zavarenog spoja	Uzorak br.		ZS		MŠ			Tvrdoća ZS – HV		
			R_e	R_m	R_e	R_m	A	ZUT		MŠ
			MPa	MPa	MPa	MPa	%	min	Max	≈
LM	1		761	825	796	848	22.1	330	225	265
	5		739	825	783	811	22.2	385	228	260
		ϵ_{pl}	0.09		0.10-0.14					
LS	2		761	793	672	767	22	335	222	242
	6		759	786	693	749	23.3	325	230	240
		ϵ_{pl}	0.16		0.12-0.14					
SAW-C	3		774	804	633	762	23.5	335	232	240
	7		754	795	722	778	24	330	220	258
		ϵ_{pl}	0.12		0.12-0.14					
SMAW-C	4		782	822	757	796	21.8	335	220	265
	8		769	800	781	814	20	325	225	255
		ϵ_{pl}	0.085		0.07-0.11					

ZUT-Zona uticaja toplote, ϵ_{pl} - plastična deformacija [%]

Kao što se može zapaziti iz rezultata ispitivanja, vrednosti osciluju između uzoraka. To se dešava iz dva razloga. Prvi je zbog koncentracije napona, od same geometrije i zavarivanja, koji utiču na deformacije. Drugi razlog je tehnološki, zbog samog postupka zavarivanja, tzv. under matching, . U vezi s tim, dobijamo različite vrednosti za SMAW i SAW postupak.

Obzirom na različitu raspodelu napona, detaljnije opisanih u poglavlju 7, longitudinalni zavareni spojevi su opterećeniji od radijalnih ZS, i tu imamo razliku u vrednostima. Realno je očekivati prve deformacije u samom ZS, zbog pomenute tehnologije zavarivanja, i to u zonama povišene koncentracije napona i prisutnih nepravilnosti ili defekata u ZS.

7. NUMERIČKA SIMULACIJA PROTOTIPA CEVOVODA HE „BAJINA BAŠTA“

Kao što je već napomenuto u pregledu literature u drugom poglavlju cilj ove numeričke simulacije jeste da se pokaže celokupno naponsko stanje napojnog cevovoda u najopterećenijem delu i da se uporede sa eksperimentalnim. Samo što će se u ovom numeričkom modelu posmatrati treći segment koji do sada nije uziman u obzir, koji sadrži dva metalna šava LS4 i LM2, koji su izgrađeni sa različitim tehnologijama zavarivanja. Zavareni spoj LS4 je radjen sa postupkom EPP i kod njega se javlja efekar „undermečinga“ što predstavlja da je napon tečenja MŠ manji od napona tečenja osnovnog materijala. Efekat „undermečinga“ je ostvaren iz razloga da bi se smanjila sklonost ka pojavi hladnih deformacija, odnosno krtog loma iz razloga što je osnovni materijal Sumiten SM80P sklon. Drugi zavareni spoj je radjen sa E postupkom i kod njega se javlja „normalmečing“. Tu možemo videti ponašanje ova dva spoja pri radnom pritisku od 9,02 MPa, a zatim i pod pritiskom od 12,05Mpa.

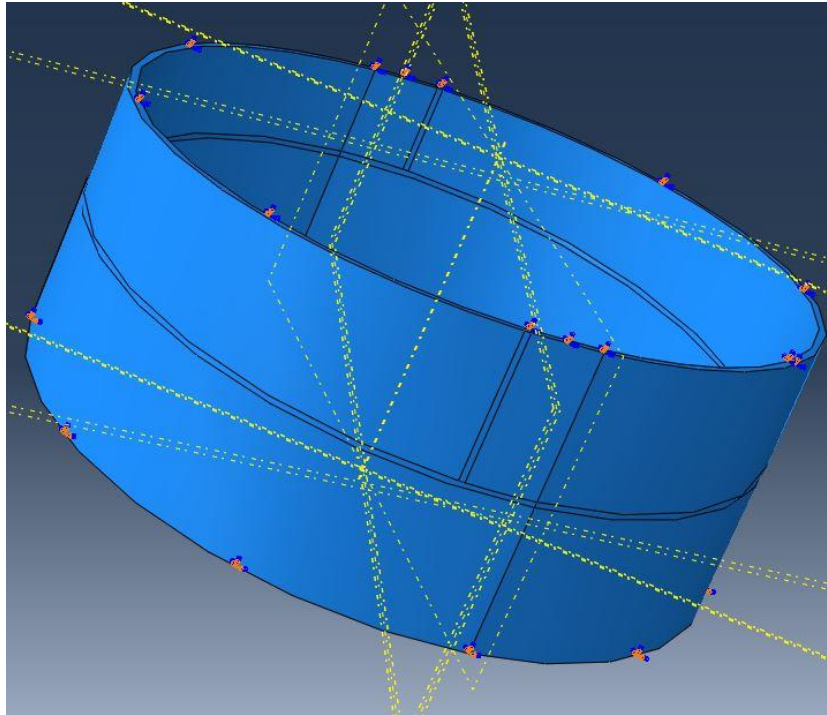
Cilj je da se dobije numerički model koji će pokazati pouzdane podatke i sa što manjim odstupanjem od eksperimentalnog. Mehaničke karakteristike koje su korišćene za numerički proračun za OM i za dva MŠ nalazi se u tabeli 6.1. Ove mehaničke karakteristike odgovaraju stvarnim vrednostima napona i deformacija, proračunatih na osnovu inženjerskih krivi napon-deformacija. Za potrebe proračuna plastičnosti u ABAQUS-u je neophodno prvo izračunati ove vrednosti, koje u obzir uzimaju i smanjenje poprečnog preseka pri značajnoj deformaciji.

Tabela 6.1. Mehaničke karakteristike za numeričku simulaciju /6.1/

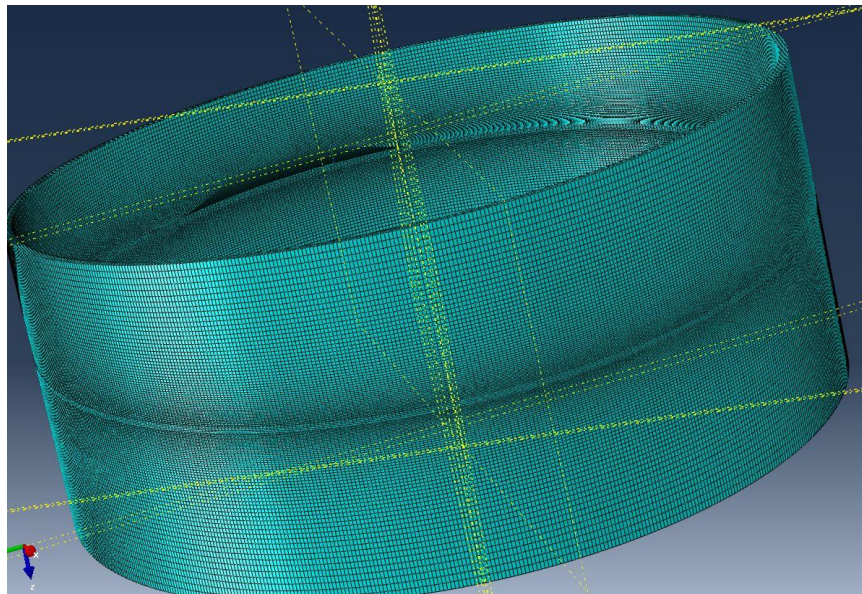
Materijal	Napon tečenja [MPa]	Zatezna čvrstoća [MPa]	Izduženje [-]
OM	760,7288	1183,669	0,2651
LS4 (SAW)	587,106	801,714	0,2651
LM2 (MAW)	724,54	996,3	0,207

Granični uslovi i mreža konačnih elemenata prikazani su na slikama 6.1 i 6.2 kao u /6.1/. Donja površina prstena je fiksirana, dok je gornji prsten ograničen u svim smerovima, osim duž ose. To je zbog činjenice da je donji prsten ojačan duž njegovog obima na prototipu, dok gornji nije, a u eksperimentu se mogao proširiti u radijalnom smeru.

Mreža je određena sitnijim elementima u oblastima koje nas zanimaju. Ukupan broj elemenata bio je 147400, dok je ukupan broj čvorova bio 223110. Za ovu simulaciju korišćeni su standardni linearni šestostrani elementi (C3D8R).

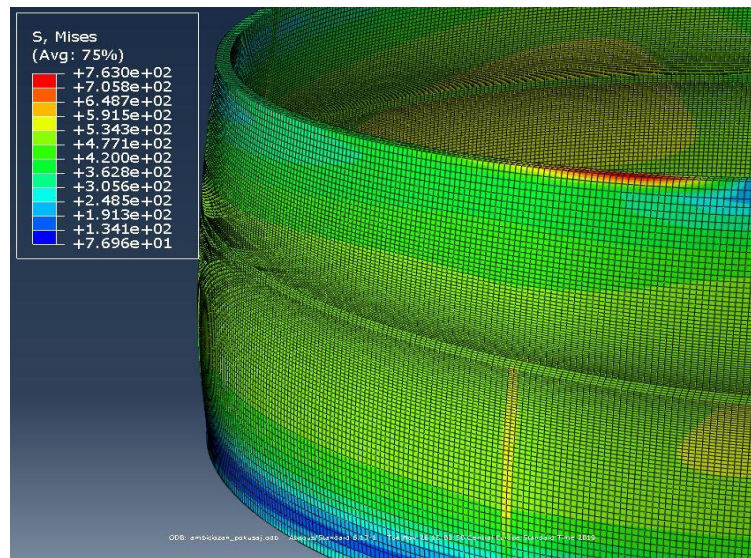


Slika 7.1 Model i granični uslovi prototipa cevovoda odrađen u programu ABAQUS/6.1/

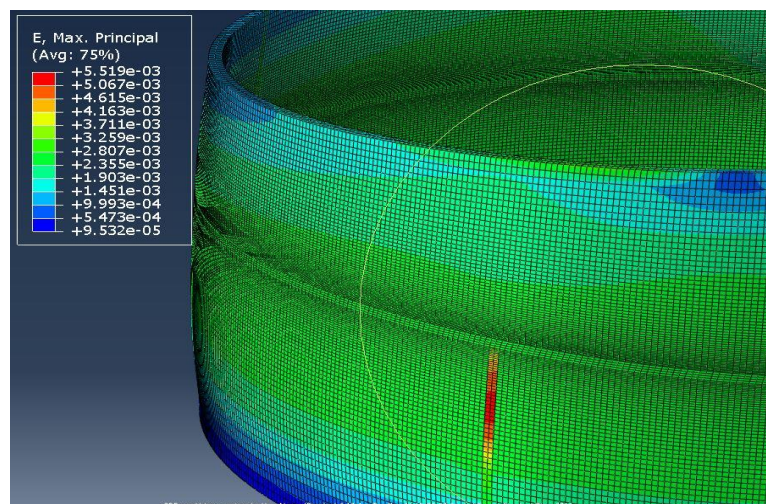


Slika 7.2 Mreža konačnih elemenata prototipa cevovoda odrađen u programu ABAQUS/6.1/

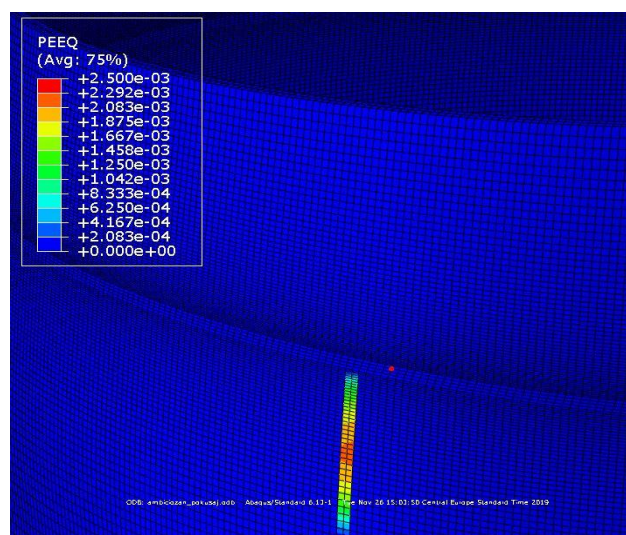
Kada samo definisali mrežu konačnih elemenata i granične uslove, sada ćemo ga opteretiti ispitnim pritiskom od 12,05 Mpa, koji je korišćen u realnim uslovima i videti kako se ponašaju spojevi LS4 i LM2. Za praćenje ponašanje zavarenog spoja LS4 koristićemo podatke sa mernih traka 27 i 23, tabela 7.10. Ponašanje spoja LM2 pratićemo pomoću podataka sa mernih traka 24 i 25, tabela 7.11. Treba napomenuti da su se u numeričkom proračunu koristili zaostali naponi od 100 MPa, koji su korišćeni u prethodnim numeričkim analizama. Na prve tri slike prikazaćemo rezultate za spoj LS4, slika 7.3-7.6, /6.1/



Slika 7.3 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LS4 za pritisak od 12,05MPa /6.1/



Slika 7.4 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LS4 pritisak 12,05 MPa /6.1/



Slika 7.5 Zaostale plastične deformacije za spoj LS4 za pritisak od 12,05 MPa/6.1/

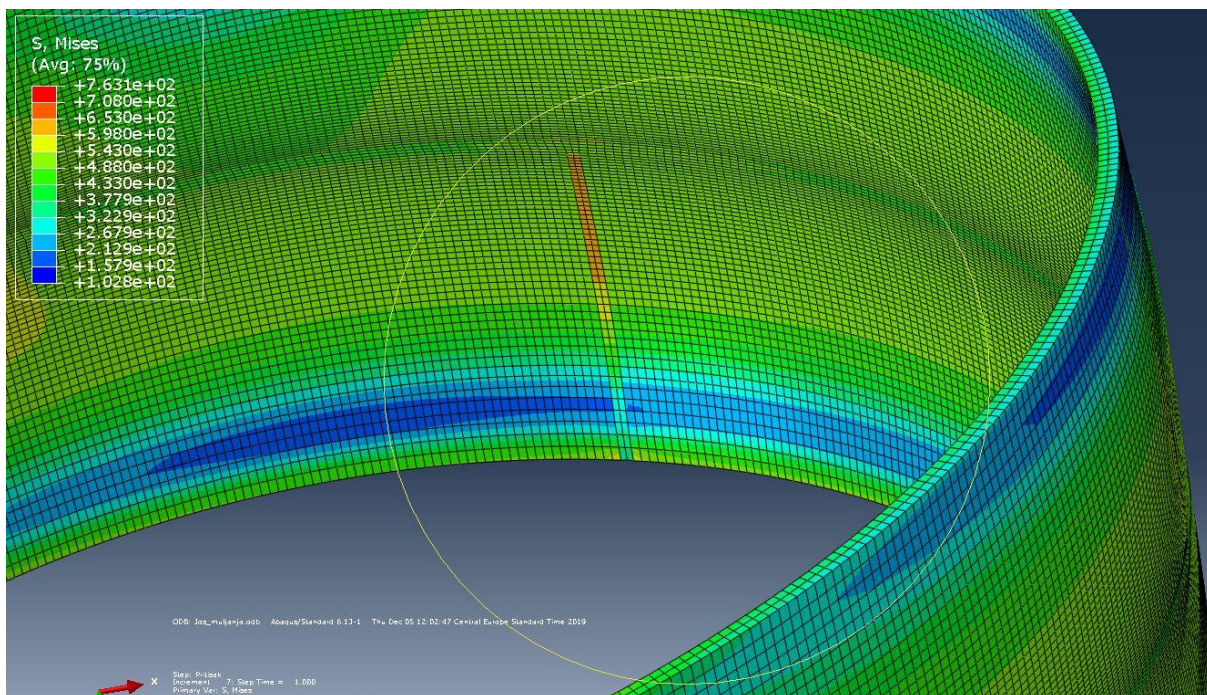
Rezultati numeričke simulacije prikazani su na slikama 7.3 (naponi) i 7.4 (deformacije). Može se videti da su naponi na relevantnoj lokaciji bili oko 632 MPa (blizu veze između dva zavarena spoja) i bili su nešto iznad definisanog napona tečenja MŠ (LS4), što je kao rezultat dalo zaostalu plastičnu deformaciju, što se može videti na slici 7.5. Ove vrednosti su odgovarale eksperimentalno utvrđenim, a njihova vrednost u posmatranom području iznosila je oko 0,1677%. Koncentracija plastične deformacije u gornjem desnom uglu se ne može zanemariti, jer je bila u području gde su određeni granični uslovi, ali ono neće ugrožavati integritet konstrukcije.

Ono što možemo zaključiti za spoj LS4 pri pritisku od 12,05 MPa ponaša slično u eksperimentalnim uslovima, kao i u numeričkoj simulaciji. Što možemo zaključiti na osnovu rezultata, gde vidimo malo odstupanje između numeričkih i eksperimentalnih podataka. Na slici se primećuje da je koncentracija smeštena u okolini mernih traka 27 i 23 (slika 6.3). Možemo primetiti da je ekvivalentna deformacija za spoj LS4 u eksperimentalnim uslovima 6428×10^{-6} (tabela 6.10), dok je u numeričkoj simulaciji ekvivalentna deformacija 5519×10^{-6} (slika 7.4). Što pokazuje veoma malo odstupanje u rezultatima.

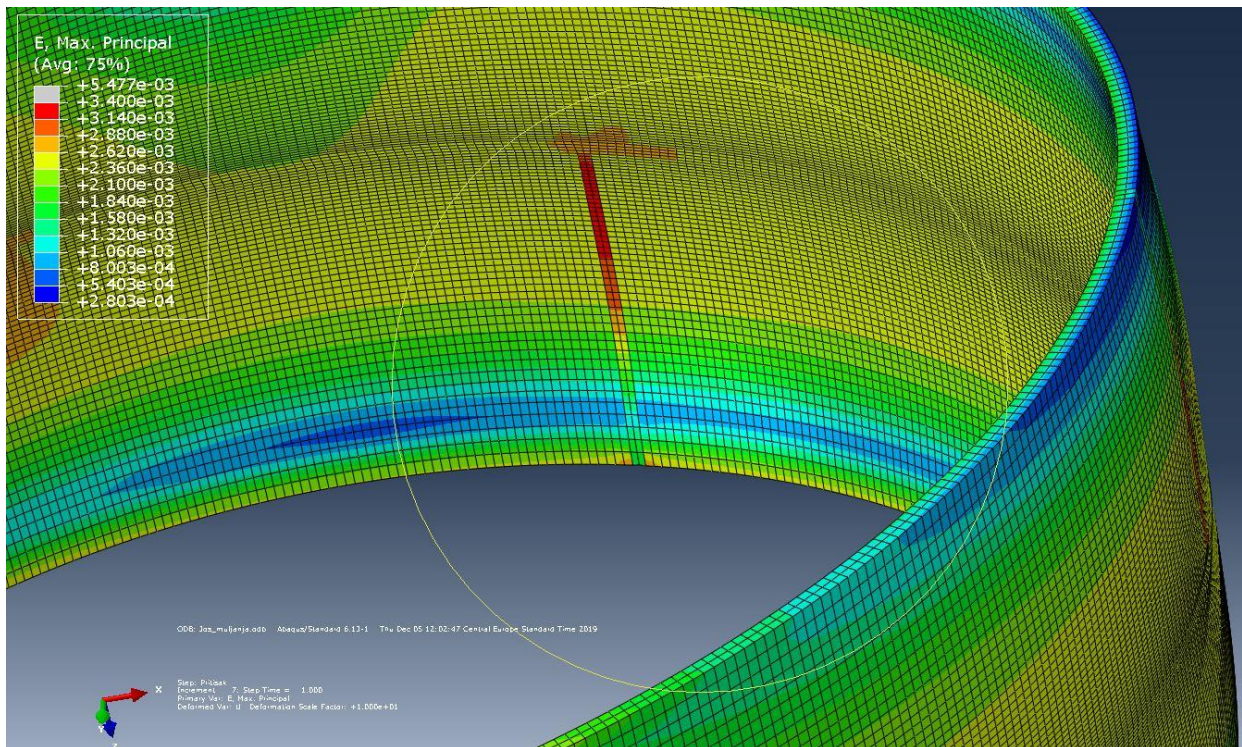
Ono što treba napomenuti da se pored spoja LS1 (slika 6.3) čija su ispitivanja rađena u prethodnim radovima, treba napomenuti da su spojevi LS4 i LM2 pri hidrostatičkim ispitivanjima takođe zabeležili najveći nivo deformacija posle spoja LS1. Kao što je već napomenuto da su i ova dva mesta jako bitna koja treba ispitivati sa aspekta integriteta cevovoda kao celine.

Sa slike 8.5 možemo primetiti da se javljaju zaostale plastične deformacije, koje su jako zanemarljive da neće ugrožavati integritet zavarene konstrukcije.

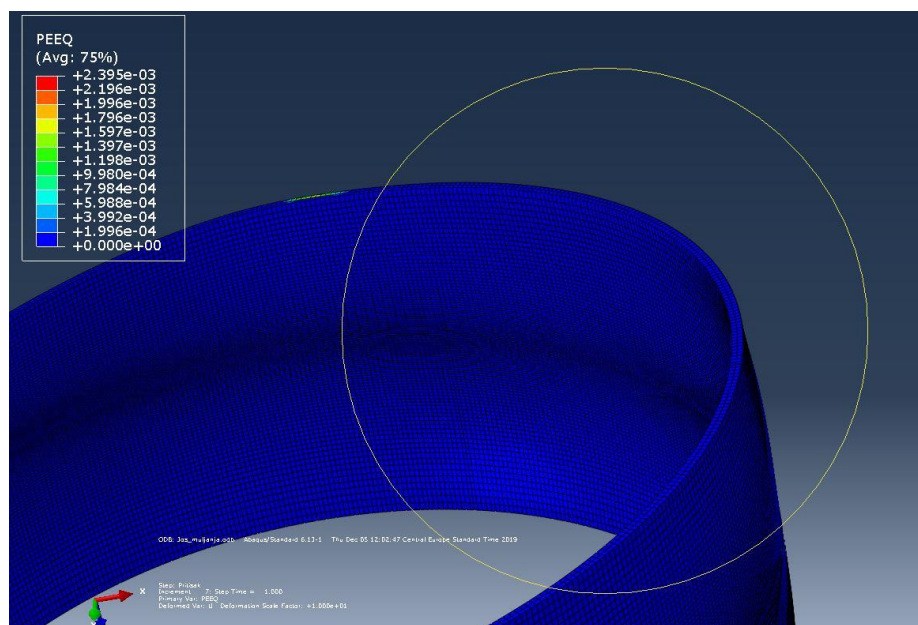
Na sledećim slikama će biti prikazani rezultati za spoj LM2 (merne trake 24 i 25), slika 7.6-7.8.



Slika 7.6 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LM2 za pritisak od 12,05 MPa/6.1/



Slika 7.7 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LM2 za pritisak od 12,05MPa /6.1/



Slika 7.8 Zaostale plastične deformacije za spoj LM2 za pritisak od 12,05Mpa

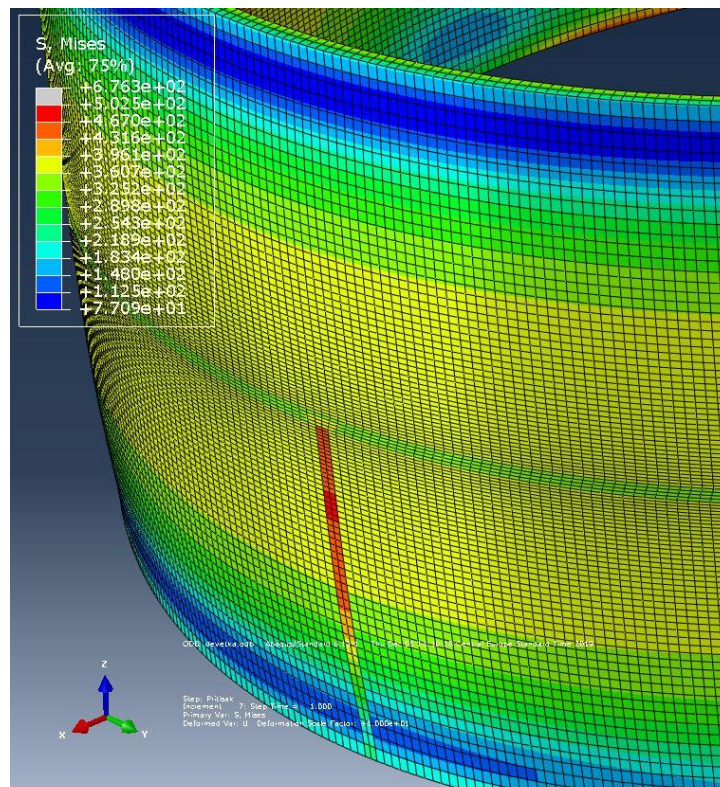
Na osnovu prethodnih rezultata možemo zaključiti da se u spoju LM2 ne javljaju zaostale plastične deformacije u zonama mernih traka 24 i 25 (slika 6.3), što je i očekivano jer ovaj MŠ ima skoro iste karakteristike kao i OM, jer je kod njega postignut efekat „normalmečing“.

Naprezanja u zavarenom spoju su bila veća (oko 700 MPa), budući da je njegov napon tečenja bio znatno veći u odnosu na LS4, što mu je pomoglo da podnese veća opterećenja. U ovom slučaju, naponi su koncentrisani u samom zavarenom spoju, sa nešto nižim vrednostima u okolnom području OM. Ekvivalentno naprezanje je takođe bilo veće u samom zavarivanju, ali pošto nije pokazalo primetno plastično ponašanje, ta razlika nije bila tako izražena kao u slučaju LS4. Najveće naprezanje primećeno je u području ZS, ispod spoja sa kružnim zavarom (merne trake 24 i 25). Treba napomenuti da se ova koncentracija naprezanja nalazila na spoljnoj strani zavarenih spojeva, što je još jednom niže od eksperimentalno izmerenih vrednosti.

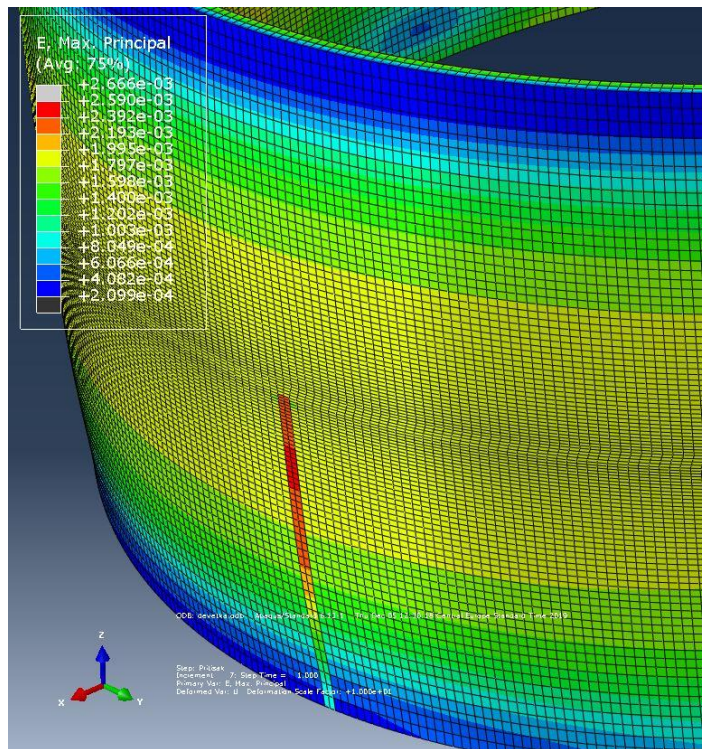
Možemo zaključiti da spoj LM2 mnogo bolje podnosi opterećenje od spoja LS4, što je bilo očekivano jer je bilo razlike u naponima tečenja MŠ i OM. Treba napomenuti takođe da je efekat „undermečinga“ u spoju LS2 rađen sa namenom da bi se izbegla sklonost ka krtom lomu i da su te plastične deformacije bile očekivane i da su planirane da se prate tokom eksploatacije. Ono što možemo primetiti da integritet ove dve tehnologije zavarivanja, kao i samog osnovnog materijala nije ugrožen sa aspekta čvrstoće i aspekta materijala.

Ono što ćemo pokazati kroz sledećih par slika jeste ponašanje OM i zavarenih spojeva LS4 i LM2 za vrednost radnog pritiska od 9,02 MPa. Što je za realnu konstrukciju u eksploataciji jako bitan pokazatelj, jer se radi o konkretnim radnim uslovima.

Prvo ćemo pokazati ponašanje zavarenog spoja LS4 pri radnom pritisku od 9,02MPa na slikama od 7.9 i 7.10.

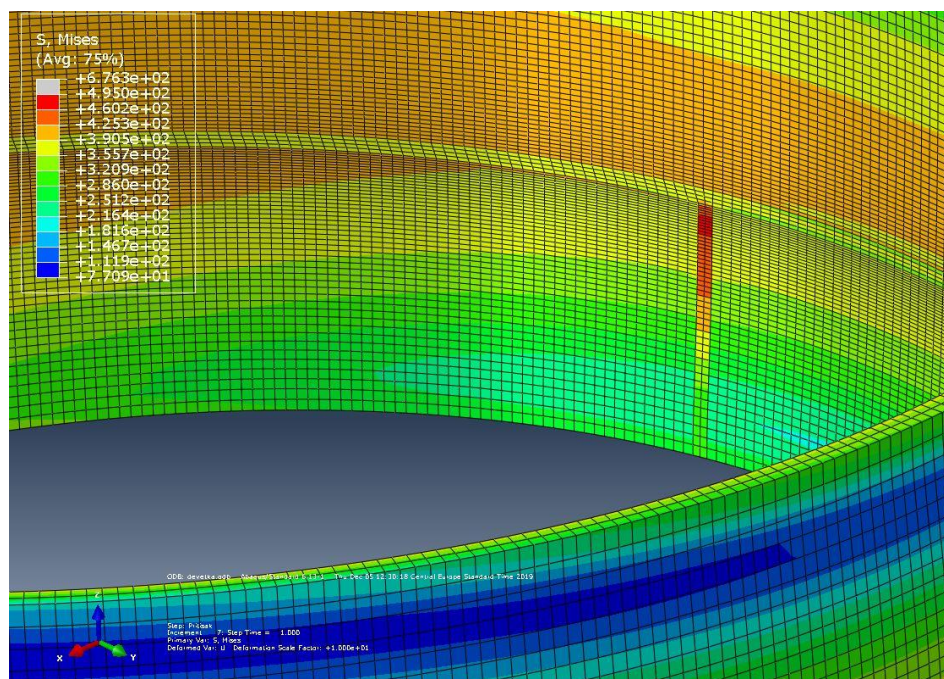


Slika 7.9 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LS4 za pritisak od 9,02MPa

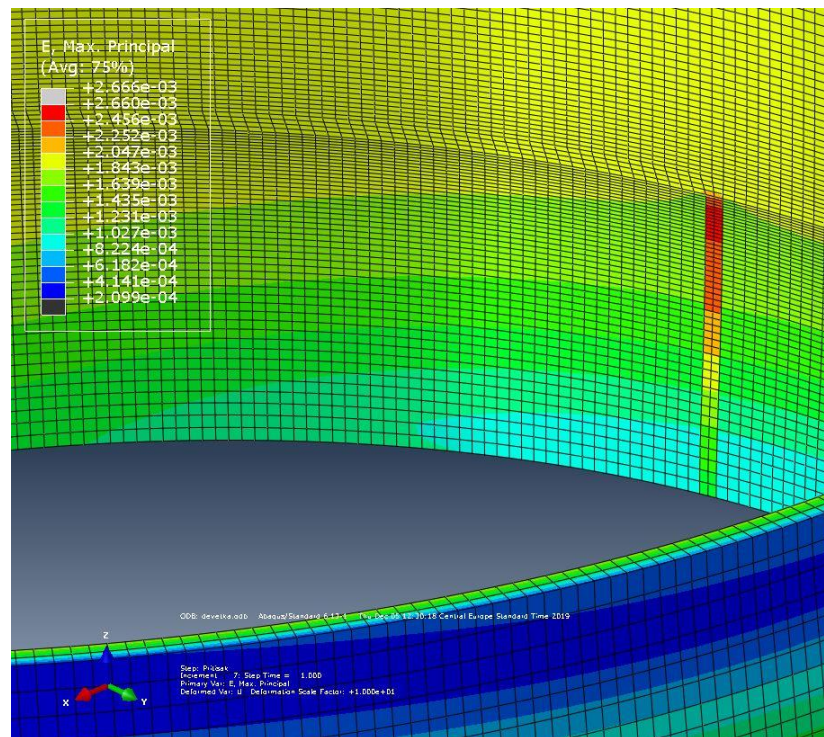


Slika 7.10 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LS4 za pritisak od 9,02 MPa

Na slikama 7.11 i 7.12 ćemo pokazati ponašanje zavarenog spoja LM2 pri radnom pritiskom od 9,02MPa

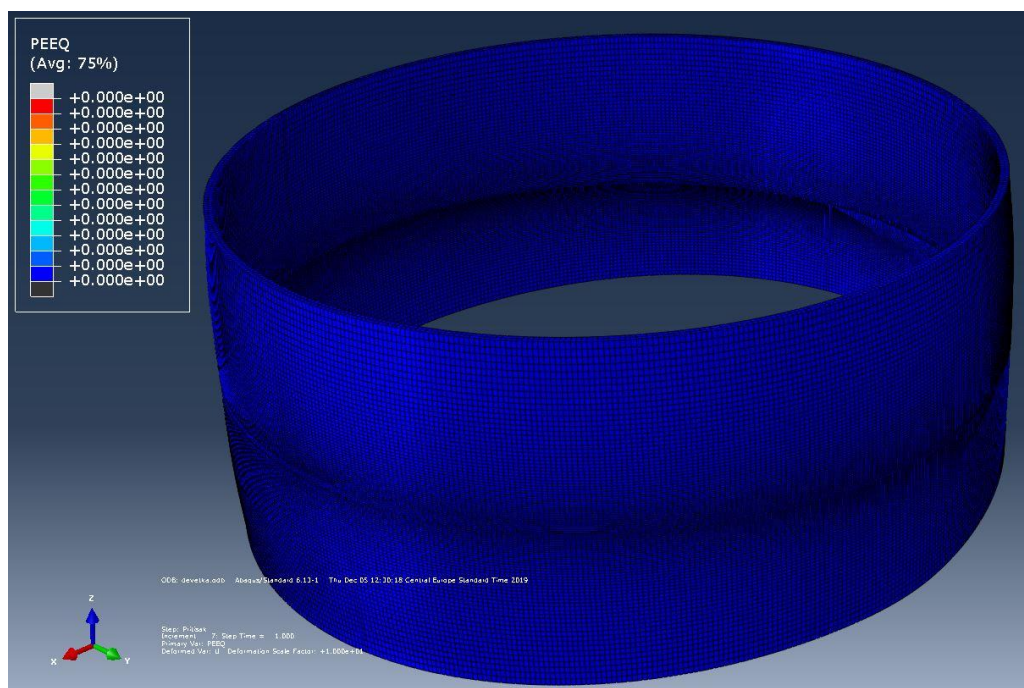


Slika 7.11 Rezultati numeričke simulacije napona za spoj LM2 za pritisak od 9,02 MPa



Slika 7.12 Rezultati numeričke simulacije deformacija za spoj LM2 za pritisak od 9,02MPa

Na slici 7.13 ćemo pokazati da nije došlo do plastičnih deformacija pri radnom pritisku od 9,02 MPa.

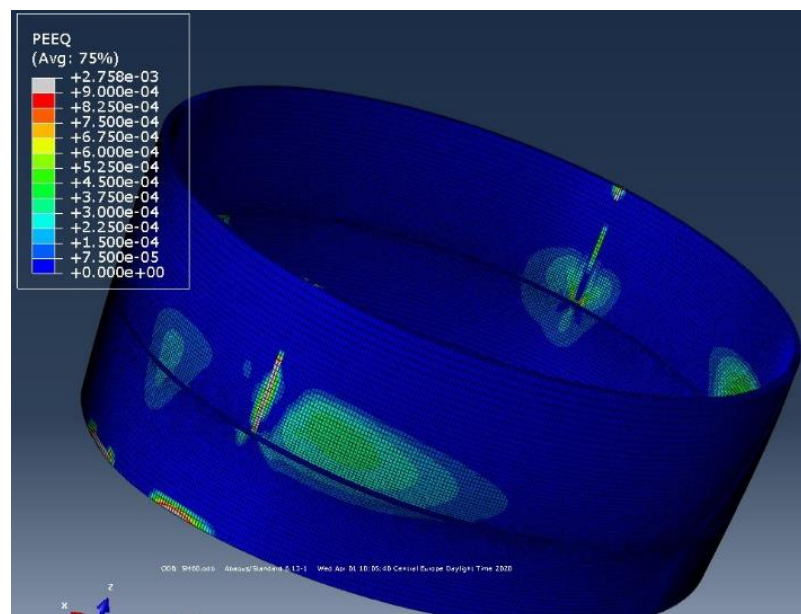


Slika 7.13 Zaostale plastične deformacije za spojeve LS4 i LM2 za pritisak od 9,02MPa

Pored toga, numerički rezultati za radni pritisak od 9,02 MPa prikazani su na slikama (7.9-7.13) za oba zavarena spoja. Može se videti da su elastična naprezanja bila znatno niža, kako se i očekivalo, i da nema plastičnog naprezanja ni u jednom delu modela, što takođe odgovara eksperimentalno dobijenim rezultatima. Rezultati su još jednom prikazani za zavareni spojevi LS4 (merne trake 23 i 27) i LM2 (merne trake 24 i 25). Dobijene ekvivalentne veličine deformacije (za elastično naprezanje) su niže u odnosu na eksperimentalne. Vrednosti naprezanja u bilo kojem delu modela nisu premašile odgovarajući nivo napona tečenja, kao što je vidljivo na slici 7.13, što pokazuje da nema plastičnog naprezanja.

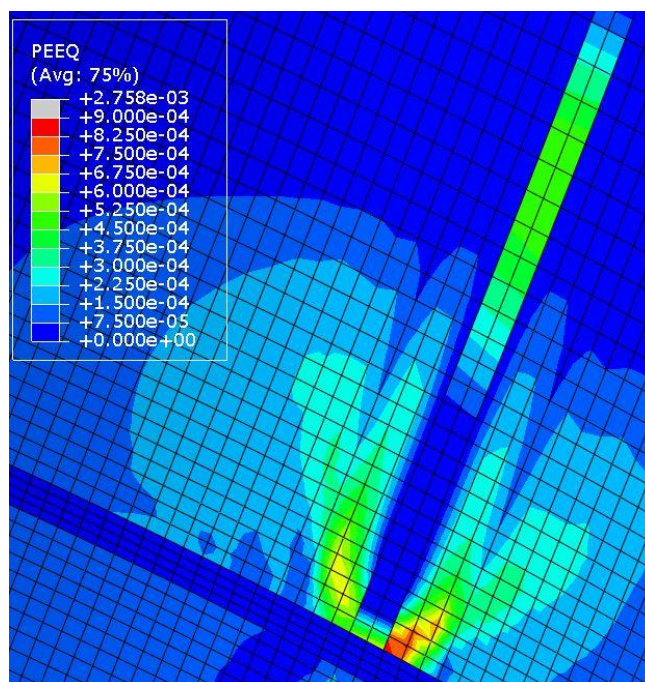
Nakon završene numeričke analize za osnovni materijal SM80P, ideja je bila da se takođe odradi numerička analiza i za SUMITEN SM60P. Treba napomenuti da je od OM SM60P izrađen ostatak napojnog cevovoda. Ovom numeričkom analizom pokazano je ponašanje materijala SM60P, pri pritisku od 12,05 MPa.

Osnovni materijal SM60P ima nešto niži napon tečenja od SM80P i on iznosi oko 520MPa, a zatezna čvrstoća je oko 600MPa. Promenom OM u modelu prototipu postiže se efekat „overmečinga“ u zavarenim spojevima. Stoga ćemo kroz narednih par slika pokazati rezultate numeričke analize prototipa sa OM SM60P pri pritisku od 12,05MPa, gde će akcenat biti stavljen na kružnim spojevima kako bi se videla njihova otpornost na plastične deformacije i krti lom.



Slika 7.14 Ekvivalentna raspodela plastičnog naprezanja za numerički model sa OM SM60P/6.1/

Možemo zaključiti sa slike 7.14 da su plastična naprezanja bila uvećana i za do 10% i na više mesta raspodeljena u odnosu na prethodnu analizu, što je bilo i očekivano zbog nižih mehaničkih karakteristika OM i efekta overmečinga. /7.1/



Slika 7.15 Ekvivalentna raspodela plastičnog naprezanja za numerički model sa OM SM60P u kružnim zavarenim spojevima /6.1/

Na slici 7.15 možemo videti raspored plastičnog naprezanja u kružnom spoju CS na mestu njegovog spajanja sa vertikalnim spojem LS3, gde je plastična deformacija iznosila 0,09%. Može se primetiti da je vrednost plastičnih deformacija bila ista kao kod spoja LS4 u prethodno odrađenoj analizi. /6.1/

Na osnovu ovde dodatne numeričke analize sa promenom OM može se zaključiti da materijal SUMITEN SM60P takođe ima zadovoljavajuće mehaničke karakteristike i otpornost prema plastičnim deformacijama i krtom lomu i da će u potpunosti zadovoljiti uslove radnog pritiska od 9,02 MPa. Treba napomenuti i što je očigledno da je materijal SM80P daleko bolji materijal od SM60P za projektovanje prototipa zbog veće čvrstoće, koje se zahtevalo u ovom delu cevovoda zbog kritične vrednosti naponskog stanja.

8. OCENA RIZIKA NA OSNOVU INTEGRITETA NAPOJNOG CEVOVODA

Analiza rizika predstavlja jedan nov pristup rešavanju problema procene integriteta konstrukcija. Upravljanje rizicima u okviru procesa poslovanja predstavlja izazov svake savremene kompanije, posebno u industrijskim procesima gde pojedini rizici mogu biti na izuzetno visokom nivou, a njihove posledice velike. Nove procedure donošenja odluka zasnovanih na rizicima predstavljaju efikasno operativno sredstvo, ukoliko se koriste na ispravan način /8.1-8.4/.

Procena rizika integriteta i veka posude pod pritiskom izvedena je primenom novog koncepta zasnovanog na primeni matrice rizika za procenu nivoa rizika prema verovatnoći i posledicama kvara. Prvo se fokusiramo na procenu posledica, kao što je prikazano u tabeli 8.1. Opisan je i donekle proizvoljan, ali funkcionalan i koristan u praktičnoj primeni /8.5/.

Tabela 8.1. Opisana matrica rizika, /8.6/

	Potencijalne posledice				Frekvencija događaja				
	Ljudi	Imovina	Životna sredina	Reputacija	A	B	C	D	E
					Zanemarljiva	Mala	Umerena	Srednja	Velika
0	Nema povreda	Nema gubitka	Nema oštećenja	Nema povreda					
1	Beznačajne povrede	Gubitak do 10 hiljada EUR	Malo oštećenje okoline	Beznačajne posledice. Postoji svest među zaposlenima i stanovništvu.	MALI RIZIK				
2	Male povrede	Gubitak 180.000 do 540.000 EUR	Umerene posledice. Manje oštećenje okoline. Manja investicija.	Male posledice. Postoji zabrinutost na lokalnom nivou.					
3	Ozbiljne povrede	Gubitak od 540.000 do 1,8 miliona EUR	Srednje posledice. Ograničeno oštećenje okoline (finansijska investicija).	Umerene posledice. Postoji zabrinutost na regionalnom nivou			SREDNJI RIZIK		
4	Permanenta nesposobnost	Gubitak od 1,8 do 50 miliona EUR	Velike posledice. Ozbiljne štete za okolinu. Velike investicije.	Srednje posledice. Postoji zabrinutost na nacionalnom nivou.					
5	Smrt	Gubitak preko 50 miliona EUR	Ogromne posledice. Dugotrajno i značajno oštećenje okoline. Ogromne investicije.	Ogromne. Postoji zabrinutost i reakcija na međunarodnom nivou.			VELIKI RIZIK		

Na osnovu prikazane matrice rizika, predstavljene u tabeli 8.1, može se zaključiti sledeće: Pošto nema podataka o ovakvim havarijama, umesto učestalosti može da se koristi verovatnoća, koja se određuje na osnovu procene integriteta tj. usvojen pristup neće uzeti u obzir učestalost događaja kada se procenjuje verovatnoća, jer nema nikakve veze sa razmatranim slučajem. Umesto toga, primenjivaće se inženjerski pristup, zasnovan na konceptu mehanike loma, tj. Dijagramu procene otkaza (FAD). Ovakav pristup je verifikovan u literaturi /8.7/. Kada se posmatra rizik, treba uzeti u obzir moguće posledice po ljude, imovinu, životnu sredinu i ugled kompanije. U opisanom modelu predložili smo kombinaciju kvalitativnog i kvantitativnog pristupa proceni potencijalnih posledica, kao što je dato u tabeli 8.1 u obliku matrice rizika. Ostali aspekti procene integriteta napojnog cevovoda prikazani su kroz ovu tezu.

Kao što je već jasno u slučaju napojnog cevovoda potencijalna posledica u slučaju kvara cevovoda sigurno je najviša, kategorija 5, jer bi prouzrokovala kolaps cele elektrane tj. indirektna šteta bi bila potpuno zaustavljanje reverzibilne hidroelektrane u dužem vremenskom periodu. Procenu integriteta napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ nastavićemo preko Dijagrama Analize Loma (FAD).

8.1 Dijagram analize loma

Primena Dijagrama Analize Loma (FAD), slika 8.1, istovremeno uzima u obzir opasnost od plastičnog kolapsa (x osa) i krtog loma (y osa) tako što se određuju koordinate radne tačke, na osnovu podataka o random opterećenju, veličini prsline i svojstvima materijala /8.8/.

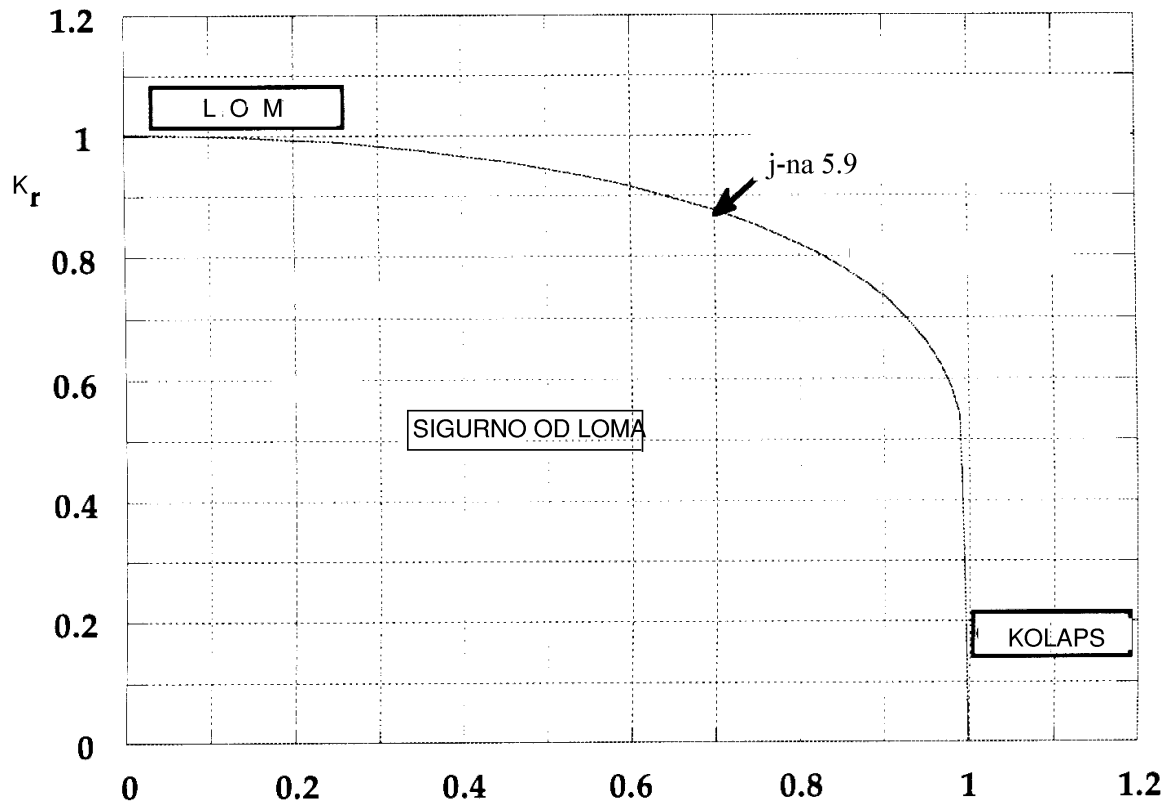
Dobijena tačka može da bude u sigurnom delu dijagrama, koje se nalazi ispod kritične krive, ili u nesigurnom delu dijagrama, koji se nalazi izvan područja kritične krive, slika 8.1. Kritična kriva se dobija na osnovu Dagdejlovog modela, a definisana je sledećom jednačinom:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-1/2} \quad (8.1)$$

gde su: S_r , količnik radnog i kritičnog napona, K_r , količnik faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti.

Na osnovu ispitivanja prototipa napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ analiziraće se sledeće kritične dve prsline, čije su dimenzije:

1. Prva prslina 90x11.75mm-dubina prsline je ¼ debljine od 47mm
2. Druga prslina 90x23.5mm- dubina prsline je ½ debljine od 47mm.



Slika 8.1. Dijagram Analize Loma

Na osnovu prethodnih ispitivanja za osnovni materijal SUMITEN SM 80P imamo sledeće rezultate za kritične vrednosti parametara mehanike loma: $J_c = 313,6 \text{ KN/m}$ - kritična vrednost J-integrala /5.8/. Preko kritične vrednosti J_c , koje smo dobili eksperimentalno računamo kritičnu vrednost faktora intenziteta napona prema sledećoj formuli: $K_c = \sqrt{(E \cdot J_c)} = 254,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} = 8054,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Veoma je važno napomenuti da je K_c faktor mehanike loma, koji predstavlja svojstvo materijala. Parametar S_r dobijamo na sledeći način: $S_c = (R_m + R_e)/2 = (800 + 700)/2 = 750 \text{ MPa}$, a za radni pritisak od 9,02 Mpa: $S_n = pR/t = 9,02 \times 2,147 / 0,047 = 412,04 \text{ MPa}$ i za ispitni pritisak od 12,05 Mpa: $S_n = pR/t = 12,05 \times 2,147 / 0,047 = 550,45 \text{ MPa}$. Konačno smo došli do parametra S_r , koji predstavlja x koordinatu na dijagramu analize loma i on iznosi:

- **S_r za radni pritisak od 9,02 Mpa: $S_r = S_n / S_c = 412,04 / 750 = 0,55$,**
- **S_r za ispitni pritisak od 12,05 Mpa: $S_r = S_n / S_c = 550,45 / 750 = 0,73$.**

Ostaje jos da se pronađe faktor intenziteta napona K_I za dve prsline, koje određujemo tako što ćemo posmatrati da su prsline površinske i korišćićemo FITNET metode za površinske prsline kod slučaja za ravnu ploču /9.9/. Ploča se uzima kao bolja aproksimacija od tankog cilindra, pošto je odnos B / r_i samo $47/2100 = 0,023$, tj. mnogo bliži 0 nego 0,1, što je najniža vrednost za cilindre u /10.9/. Pri tome se za date dve prsline koriste sledeći odnosi: $90 \times 11,75 \text{ mm}$ ($a/2c = 0,13$; $a/c = 0,26$; $a/t = 0,25$) i $90 \times 23,5 \text{ mm}$ ($a/2c = 0,26$; $a/c = 0,52$; $a/t = 0,5$) u tačkama maksimalne vrednosti faktora intenziteta napona, a to je kada je ugao $\varphi = 90^\circ$. Faktor intenziteta napona dobijamo na sledeći način:

$$K_I = \sqrt{(\pi a) \cdot \sigma \cdot M_m}, \text{ pri čemu su: (obimini naponi } \sigma = 412,04 \text{ MPa i } \sigma = 550,45 \text{ MPa)} \quad (8.2)$$

$$M_m = \frac{[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4] g f_\varphi}{\Phi} = 1,102 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 1,033 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.3)$$

$$M_1 = \left[1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c}\right)\right] = 1,106 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 1,108 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.4)$$

$$M_2 = \frac{0,89}{0,2+a/c} - 0,54 = 1,39 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 0,7 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.5)$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} = -0,589 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } -0,355 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.6)$$

$$g = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{a}{t}\right)^2\right] (1 - \sin \varphi)^2 = 1 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 1 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.7)$$

$$f_\varphi = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi\right]^{\frac{1}{4}} = 1 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 1 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.8)$$

$$\Phi = \sqrt{1 + 1,464 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}} = 1,08 \text{ za } \frac{1}{4} \text{ dužine i } 1,22 \text{ za } \frac{1}{2} \text{ dužine,} \quad (8.9)$$

Preko formule 8.2 dobijamo sledeće vrednosti faktora intenziteta napona:

$$K_I = \sqrt{(\pi a) \cdot \sigma \cdot M_m} = \sqrt{(\pi \cdot 11,75) \cdot 412,04 \cdot 1,102} = 2758,77 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \text{ za pritisak } 9,02 \text{ MPa}$$

$$K_I = \sqrt{(\pi a) \cdot \sigma \cdot M_m} = \sqrt{(\pi \cdot 23,5) \cdot 412,04 \cdot 1,033} = 3657,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \text{ za pritisak } 9,02 \text{ MPa}$$

$$K_I = \sqrt{(\pi a) \cdot \sigma \cdot M_m} = \sqrt{(\pi \cdot 11,75) \cdot 550,45 \cdot 1,102} = 3.685,47 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \text{ za pritisak } 12,05 \text{ MPa}$$

$$K_I = \sqrt{(\pi a) \cdot \sigma \cdot M_m} = \sqrt{(\pi \cdot 23,5) \cdot 550,45 \cdot 1,033} = 4885,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \text{ za pritisak } 12,05 \text{ MPa}$$

Konačno dobijamo vrednosti y i koordinata za dijagram analize loma:

$$K_r = K_I / K_c = 2758,77 / 8054,32 = 0,34,$$

$$K_r = K_I / K_c = 3657,2 / 8054,32 = 0,45,$$

$$K_r = K_I / K_c = 3.685,47 / 8054,32 = 0,46,$$

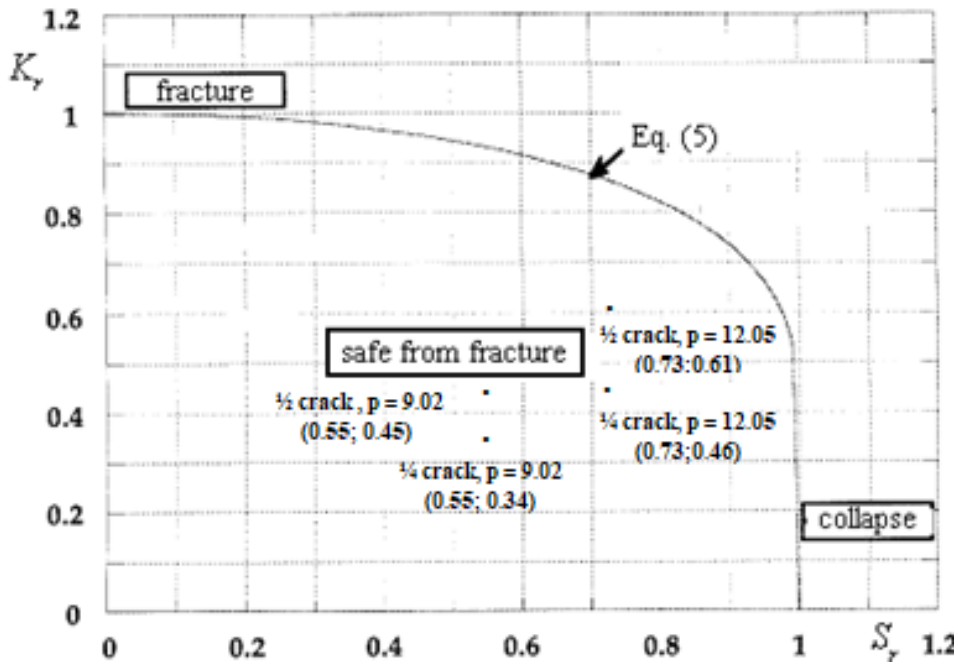
$$K_r = K_I / K_c = 4885,7 / 8054,32 = 0,61.$$

Konačno, koordinate tačaka za procenu integriteta u FAD-u su, slika 10.2:

$$\text{Za } \frac{1}{4} \text{ prsline, } p = 9,02 \text{ MPa } (0,55, 0,34), p = 12,05 \text{ MPa } (0,73, 0,46),$$

$$\text{Za } \frac{1}{2} \text{ prsline, } p = 9,02 \text{ MPa } (0,55, 0,45), p = 12,05 \text{ MPa } (0,73, 0,61).$$

Ono što možemo zaključiti na osnovu Dijagrama analize loma, slika 8.2, analizirajući dve gore navedene prsline jeste to da se radne i ispitne tačke nalaze u sigurnoj zoni loma i da integritet cevovoda RHBB nije ugrožen. Sada se može dobiti matrica rizika na uobičajeni način, kao što je prikazano u tabeli 10.2, ukazuje na pomeranje sa niskog (0,34) na srednji nivo rizika (0,46), za 1/4 prsline, ili od srednjeg nivoa (0,45) do visokog rizika (0,61) za 1/2 prsline. Kao što smo prethodno zaključili za potencijalnu posledicu uzimamo najvišu kategoriju 5. Na osnovu tabele 8.2 možemo zaključiti da rizik napojnog cevovoda RHBB spada u visoki.



Slika 8.2. Dijagrama Analize Loma za napojni cevovod RHBB

Table 8.2. Matrica rizika za 1/4 prsline i 1/2 prsline, p=9,02 MPa and 12,05 MPa

		Kategorija posledica					Nivo rizika
		1 – veoma nizak	2 - nizak	3 - srednji	4 - visok	5 - veoma visok	
Kategorija verovatnoće	≤0.2 veoma nizak						Veoma nizak
	0.2-0.4 nizak					1/4 prsline p=9,02 MPa	Nizak
	0.4-0.6 srednji					1/4 prsline p=12,05 MPa 1/2 prsline p=9,02 MPa	Srednji
	0.6-0.8 visok					1/2 prsline p=12,05 MPa	Visok
	0.8-1.0 veoma visok						Veoma visok

9. DISKUSIJA REZULTATA

Procena integriteta cevovoda HE „Bajina Bašta“ opisana je kroz prethodnih osam poglavlja ovog rada. Procena integriteta je opisana kroz prototip cevovoda, koji predstavlja najopterećenije mesto konstrukcije sa aspekta koncentracije napona i plastičnih deformacija. Što je još interesantno taj deo cevovoda je projektovan od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće SUMITEN SM 80P, sa smanjenim stepenom sigurnosti u odnosu na projektovani. Cilj ovog doktorata je bio da pokaže integritet ove zavarene konstrukcije, koja radi sa smanjenim stepenom sigurnosti već četrdeset godina u eksploataciji i da se pokaže njegovo naponsko-deformaciono stanje, kao i otpornost materijala prema krutom lomu.

Ispitivanja prototipa i njegovih zavarenih spojeva su pokazala da postoje značajne razlike u ponašanju i u osobinama osnovnog materijala i zavarenih spojeva na prototipu. Zbog toga je neophodno detaljno proučavanje osobina zavarenih spojeva, naročito na mestima gde deluju maksimalni naponi i na kojima je izražen uticaj koncentracije napona i uticaj zaostalih napona od zavarivanja. Zavareni spoj na tim mestima određuje ponašanje suda pod dejstvom opterećenja, odnosno u eksploatacijskim uslovima.

Ocena rezultata ispitivanja prototipa je moguća na osnovu proračuna napona i deformacija suda idealnog oblika. Zbog toga je prikazano rešenje tankozidnih sudova u elastičnom i elastično-plastičnoj oblasti.

Na sudu pod pritiskom je zavareni spoj izvor koncentracije napona, koja može da deluje na isti način kao i zaostali naponi. Da bi se slika o uticaju koncentracije napona i zaostalih napona razjasnila, prikazan je jedan postupak definisanja koncentracije napona usled zavarenog spoja. Svakako da u realnom ponašanju zavarenog spoja treba uzeti u obzir i uticaj heterogenosti strukture zavarenog spoja (ZUT, metal šava).

U šestom poglavlju je detaljno opisan eksperiment, koji opisuje naponsko-deformaciono stanje cevovoda pomoću prototipa. Ovim eksperimentom je pokazan integritet cevovoda na mestu najveće koncentracije napona i plastičnih deformacija, kao i integritet zavarenih spojeva određenih sa različitim tehnologijama zavarivanja. Kasnije je taj model upoređen sa numeričkim modelom, koji je pokazao da integritet cevovoda kao celine nije ugrožen i ako je u startu bio projektovan sa smanjenim stepenom sigurnosti i time se dokazalo da osnovni materijal i same tehnologije zavarivanja zadovoljavaju sve uslove čvrstoće kako ne bi došlo do loma konstrukcije.

Analizom mehaničkih rezultata ispitanih uzoraka možemo zaključiti da mnogo bolje karakteristike zavarenih spojeva daju delovi koji su zavareni ručnim elektrolučnim postupkom (E) nego oni što su zavarenim postupkom pod praškom (EPP). Uzrok tome je što je kod SAW postupka mnogo veći unos toplote. Sa druge strane prednost zavarivanja pod praškom je u tome što je mnogo veća produktivnost i to posebno kod kružnih zavara gde dužina iznosi 13m.

Primenom mehanike loma odnosno faktora intenziteta napona na prototip cevovoda sa prislinom, pokazalo se da takođe čelik SUMITEN SM80P, kao i zavareni spojevi imaju zadovoljavajuću otpornost prema rastu prsline.

Na kraju je na osnovu integriteta cevovoda odrađena analiza rizika, kao jedan od glavnih pokazatelja savremenog pristupa konstruisanja. I na osnovu analize loma i matrice krutosti možemo zaključiti da se cevovod RHBB nalazi u sigurnoj zoni i da neće doći do loma konstrukcije.

10. ZAKLJUČAK

Primena niskolegiranih čelika visoke čvrstoće za zavarene konstrukcije sudova pod pritiskom zahteva da se uzme u obzir mala razlika između napona na granici tečenja i zatezne čvrstoće, odnosno da se analiziraju osnovni faktori koji mogu da dovedu pojave krtog loma:

- rad na niskim temperaturama;
- postojanje prslina u konstrukciji i uticaj ravne deformacije oko vrha prsline;
- ravna deformacija zbog debljine zida suda;
- velika brzina dejstva opterećenja.

Eksperimenti sa prototipom i sa epruветama su vođeni da se dobije slika o ponašanju zavarenih spojeva HSLA čelika u realnim uslovima opterećenja i u uslovima koji pogoduju krtom lomu. Dobijeni podaci mogu da se razvrstaju u dve grupe:

1. podaci koji opisuju plastično ponašanje zavarenog spoja;
2. podaci koji pokazuju osobine zavarenog spoja u uslovima mogućeg krtog loma.

Plastično ponašanje zavarenih spojeva prototipa ocenjeno je uzimanjem u obzir stvarnog, dvoosnog stanja napona na spoljnoj površini, koje je definisano na osnovu podataka sa mernih traka, očitanih pri opterećivanju prototipa. Analiza je pokazala da se dvoosno stanje napona, sračunato na osnovu izmerenih deformacija, poklapa sa teorijskim proračunom za homogeni sud na mestima gde je uticaj koncentracije napona neznatan. U slučaju znatnog uticaja koncentracije napona dolazi do prekoračenja granice tečenja metala šava i do izraženih lokalnih plastičnih deformacija, koje iznose 0,3 % na rasterećenom prototipu posle dejstva maksimalnog opterećenja ispitivanja.

Imajući u vidu da je pri ovom ispitivanju potvrđeno da se rasterećeni sud ponaša potpuno elastično do nivoa prethodnog opterećenja, može se zaključiti da će se pri daljem povećanju opterećenja plastična deformacija dalje razvijati na mestu gde je dostigla najveći iznos. Realna slika ponašanja pokazuje da je do naznačene plastične deformacije metala šava došlo pri opterećenju koje je osetno niže od opterećenja potrebnog da se dostigne nazivna granica tečenja metala šava, što se može pripisati zaostalim naponima od zavarivanja i koncentraciji napona. Pitanje, koje je značajno razmotriti i eksperimentalno proveriti, odnosi se na plastičnu deformaciju koja se može saopštiti metalu šava i zavarenom spoju, a da sigurnost suda kao celine ne bude ugrožena. Pri tom treba imati u vidu i smanjenje koncentracije napona kada dođe do plastičnih deformacija, a ovaj uticaj pogoduje sigurnosti suda.

Ispitivanja mehaničkih karakteristika zavarenih spojeva pokazuju zadovoljavajuće osobine. Utvrđeno je veoma dobro ponašanje zavarenih spojeva na niskim temperaturama, mereno na Šarpi klatnu sa osciloskopom, što ukazuje na značajnu otpornost prema razvoju krtog loma. Potvrđuje da

zavareni spojevi nisko legiranog čelika visoke čvrstoće imaju sposobnost da zaustave razvoj prsline svojom plastičnom deformacijom.

Ispitivanja zatezanjem epruveta iz metala šava i iz zavarenog spoja potkrepljuju gledanja da se plastičniji metal šava može tretirati kao mekši sloj u kompozitu. Naime, iako je napon na granici tečenja pri zatezanju metala šava u nekim slučajevima i niži od nazivnih vrednosti, u zavarenim spojevima istog šava dobijene vrednosti osetno premašuju veličinu nazivnog napona na granici tečenja.

Može se oceniti da su osobine zavarenih spojeva niskolegiranog čelika povišene čvrstoće zadovoljavajuće, kako u pogledu otpornosti prema razvoju krtog loma, što je utvrđeno standardnim i posebno razvijenim postupcima računске analize i eksperimentalnih ispitivanja.

Prethodna ispitivanja urađena u ovoj disertaciji su pokazale sledeće:

- da osnovni materijal, kao i zavareni spoj imaju zadovoljavajuću otpornost prema krtom lomu,
- da mehaničke karakteristike cevovoda kao celine su veoma dobre,
- da tehnologija zavarivanja ispunjava sve uslove sa aspekta čvrstoće,
- da osnovni materijal, kao i zavareni spoj imaju odličnu otpornost prema prslinama što su pokazali parametri mehanike loma tj. Dijagram loma i matrica rizika,
- da zaostale plastične deformacije i koncentracija napona ne ugrožavaju integritet cevovoda što se i pokazalo kako eksperimentalnim, tako i numeričkim ispitivanjima.

Na osnovnu prethodne analize možemo oceniti da integritet cevovoda HE „Bajina Bašta“ nije ugrožen, iako je projektovan sa smanjenim stepenom sigurnosti od projektovanog i da se redovnim ispitivanjima i analizama tokom remontima, ovakvo stanje konstrukcije može zadržati.

Naučni doprinos ove doktorske disertacije je u tome što su razvijeni novi numerički modeli i eksperimentalne procedure koji imaju mnogo veliku primenu u oblasti procene integriteta zavarenih konstrukcija.

Ovakav način analiziranja problema ima veliku primenu i od faze konstruisanja novih konstrukcija i opreme, i u fazi reparacije i održavanja postojećih postrojenja u eksploataciji. Primena numeričkog modela ima veliku primenu u naftnoj industriji, gde se vrši instalacija odgovornih konstrukcija koje imaju takođe velike materijalne vrednosti (posebno u offshore industriji). Prednost ove analize se ogleda u tome što se dobijaju pouzdani rezultati, koji se dosta brži sprovode nego ekperimentalna ispitivanja, a pri tome je ponovljivost proračuna veoma jednostvana i ne zahteva vreme.

Ostavljanje prostora za dalji tok istraživanja ove doktorske disertacije ogleda se u tome da treba uzeti u obzir kod numeričkoj simulaciji zonu uticaja toplote kod zavarenih spojeva (ZUT). ZUT je veoma značajna zona za integritet konstrukcije na mestima zavarenih spojeva, posebno na konkretnom slučaju, a ovde je u pitanju napojni cevovod koji je rađen sa različitim postupcima zavarivanja i koji će prouzrokovati različite širine ZUT-a.

Kao predlog za buduća istraživanja integriteta napojnog cevovoda HE „Bajina Bašta“ predlaže se da se prave numerički modeli koji će uzeti u obzir ZUT. Takođe mogu da se rade istraživanja na uticaj betonske košuljice, sa kojom je obložen cevovod, na integritet same konstrukcije. Poželjno je isto baviti se primenom savremenih IBR metoda, kao što su napredne tehnike ultrazvuka, na ispitivanju kritičnih mesta na cevovodu, jer je mnogo jeftinije ispitati cevovod pomoću IBR metoda na kritičnim mestima i skinuti antikorozioni premaz, nego iskopavati celu konstrukciju.

11. LITERATURA

- 1.1 Lazar Jeremić: Tehnologija zavarivanja startne boce izrađene od čelika klase WB36 posle 220000 sati rada, master rad, Beograd, jun 2015.
- 2.1 Tihoslav Tošić: Cevovod pod pritiskom za RHE “Bajina Bašta” (Tehnologija proizvodnje čeličnih kosntrukcija), Society for Structural Integrity and Life (DIVK), Belgrade, 2012.
- 2.2 Cevovodi pod pritiskom hidroelektrana , Referati i diskusije sa konsultacije održane 1976. godine, Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd, 1979.
- 2.3 Sedmak, A.; Sedmak, S.; Milovic, Lj.; Pressure Equipment Integrity Assessment by Elastic-Plastic Fracture Mechanics Methods, Monograph, Society for Structural Integrity and Life (DIVK), Belgrade, 2011, pp 163-190.
- 2.4 Sedmak, S.; Sedmak, A.; Integrity of Penstock of Hydroelectric Power plant, Structural Integrity and Life 5, 2005, pp. 59-70
- 2.5 Igor Martić, Uticaj ispitivanja probnim pritiskom na nastanak i rast prslina u zavarenim spojevima opreme pod pritiskom, doktorska disertacija, Beograd, 2018
- 2.6 Igor Martić, Aleksandar Sedmak, Nenad Mitrović, Simon Sedmak, Ivana Vučetić: Effect of Over-Pressure on Pipeline Structural Integrity, [Technical Gazette, Vol. 26 No. 3, 2019](https://doi.org/10.17559/TV20180708213323), ISSN 1330-3651(Print),eISSN18486339,<https://doi.org/10.17559/TV20180708213323>
- 2.7 Mahdi M. A. Algool, Initial plastic deformation and residual stress influencing the welding joint behavior in the presence of cracks, Doctoral Dissertation, Belgrade, 2015.
- 2.8 U. Tatic, S. Sedmak, A. Djurdjevic, A. Sedmak, R. Bakić, Numerical Modeling of Full-Scale Penstock Model Testing, Proc.of the 3rd Int.Conf. Numerical Modeling of Full-Scale Penstock Model Testing, September 2013, Graz University of Technology – Austria.
- 3.1 H. Horikawa, S. Matsui, S. Murase, H. Nakajima, S. Satoh: Application of the y Groove Restraint Cracing Test for Heavy Plates, IIW Doc. IX 965 -76.
- 3.2 H. Suzuki, N. Yurioka: Prevention against cold carcking in welding steels, Australian Welding Journal, 1982, 9 – 27.
- 3.3 H. Suzuki: Cold cracking and its prevention in steel welding, IIW Doc. 1107 – 91.
- 3.4 H. Suzuki: Comparasion of carbon equivalents for steel weldeability, IIW Doc. IX – 1306 – 84.
- 3.5 C. Duren: Equations for the prediction of cold cracking resistance in field welding large diameter pipes, IIW Doc. 1356 – 85.

- 3.6 H. Granjon: Pojava hladnih pukotina pri zavarivanju čelika, IIW Doc. IX - 748 – 71.
- 3.7 I. Hrivnjak: Zavarljivost čelika, Građevinska knjiga, 1982.
- 3.8 K. Gerić: Pojava i rast prslina u zavarenim spojevima čelika povišene čvrstoće, Doktorska disertacija, TMF Beograd, 1997.
- 3.9 R. Jovičić: Žilavost zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika na niskim temperaturama, Zavarivač, 1990, No 1, 5 – 13.
- 3.10 L. Vehovar, S. Ažman: Izveštaj o međusobnom poređenju otpornosti čelika NIOMOL 490 K i Č.0562 na sulfidnu naponsku krtost, Institut za matala i tehnologiju, Ljubljana, 1998.
- 3.11 I. Hrivnjak: Teorija Zvaritelnosti Kovova a Zlitin, Vydavatelstvo Slovenskej Akademie Vied, Bratislava, 1989.
- 3.12 H. Granjon: Bases Metallurgiques du Soudage, Soudure Autogene, Paris, 1998.
- 3.13H.Suzuki, N. Yurioka: Weldability of Line – Pipe Steels and Prevention of Cracking in Field Welding, Doc. IIW – IX – 1458 – 87.
- 3.14 I. Hrivnjak: Teorija Zvaritelnosti Kovova a Zlitin, Vydavatelstvo Slovenskej Akademie Vied, Bratislava, 1989.
- 3.15 D.B. Meester J. Defourny: Proc. Of the International Conference Welding Science and Tehnology, Slovakia, 1996, 65 – 80.
- 3.16 V. Šijački – Žeravčić, A. Milosavljević, A. Sedmak: Priručnik za mašinke materijale, Beograd, 1996.
- 3.17 Radomir Jovičić: Analiza uticaja prslina na integritet feritno - austenitnih zavarenih spojeva, doktorska disertacija, Beograd, 2007, pp 7-12.
- 3.18 Izvodi sa predavanja sa kursa za Međunarodnog inženjera za zavarivanje, Mašinski fakultet Beograd, 2016.
- 4.1 A.A. Wells, Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. British Welding Journal 11: 563-570, 1963 .
- 4.2 A. Sedmak: Primena mehanike loma na integrutet konstrukcija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2003.
- 4.3 ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials ESIS P2-92, TC1, 1992
J.R. Rice, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. J. Appl. Mech. 35, pp. 79-386, 1968.

- 4.4 S.Sedmak, A.Sedmak, N.Vukomanović, Theoretical, Numerical and Experimental Analysis of Cracked Welded Tensile Panel, Proc. of ECF8 'Fracture Behavior and Design of Materials and Structures', pp. 1596-1599, Torino, 1990
- 4.5 A. Sedmak: The role of weldment interfaces in fracture mechanics parameters evaluation, Proc. of ICF9, Vol. 5, p. 2345-2356, Sydney, Pergamon Press, 1997
- 4.6 V.Lačarac, A.Sedmak, Analiza uticaja dužine prsline i heterogenosti zavarenog spoja na nezavisnost J-integrala, Međunarodno savetovanje "Zavarivanje 96 - zavarivanje u energetici", Beograd, 1996.
- 4.7 A. Sedmak, S. Sedmak, Weldment fracture mechanics parameters evaluation, Proc. of YUC-TAM 97, XXII Kongres teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja, str. 73- 83, 1997.
- 4.8 S. Sedmak, B. Petrovski, A. Sedmak: The Resistance to Crack Growth of Different Regions of Weldments in a Real Structure, Int. J. Pres. Ves. & Piping 52, 1992, 313-335
- 4.9 S. Sedmak, B. Petrovski, A. Sedmak: Crack significance evaluation with special reference to welded structures, Fracture Mechanics, Strength and Integrity of Materials, Jubilee Book Devoted to V. V. Panasyak (Ed. O.M. Romaniv), Shevchenko Scientific Society, Lviv, Ukraine, 205, 1996.
- 4.10 S. Sedmak, T. Adžiev, J. Gočev, A. Sedmak: Computerized test for J integral measurement on welded panels, Proc. Int. Conf. on Computerization of Welding Info IV, AWS, Orlando, 1992, p. 161
- 4.11 S. Sedmak, T. Adžiev, A. Sedmak, J. Gočev, Experimental and numerical analysis of cracked welded joints, Proc. of ICM 7, Hague, 1995, pp. 291, 1995
- 4.12 J. Gočev, T. Adžiev, A. Sedmak, Procena integriteta zavarenih konstrukcija ispitivanjem pločastih epruveta na savijanje, Sedma Međunarodna Letnja Škola MehanikeLoma, nured. S. Sedmak, A. Sedmak, GOŠA-TMF, str. 213, 2000
- 4.13 ASTM E399-87, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01. p. 522. 1986
- 4.14 BSI 5447. Method of Test of Plain Strain Fracture Toughness K_{Ic} of metallic materials, BSI
- 4.15 BS 7448. Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials, BSI, 1991
- 4.16 ASTM E813-89, "Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 04.01. p. 651.
- 4.17 ASTM E 1152-91, "Standard Test Method for Determining J-R Curve" Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 04.01. p. 724.
- 4.18 ASTM E1290-89: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, Annual Book of ASTM Standards 1989, Vol. 04.01.

- 4.19 ASTM E 1737-96: Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards 1996, Vol. 04.01.
- 4.20 ASTM E1820-99a: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards 1999, Vol. 04.01.
- 4.21 R.P. Rid, R.E. Šram, Prijemna kontrola kružnih zavarenih spojeva cevovoda sa naglaskom na ispitivanje bez razaranja, Monografija III Letnje škole mehanike loma ured. S. Sedmak), GOŠA, TMF, 1985, str. 307-318.
- 4.22 D.T.Rid, Analiza mehanike loma i krive dopuštenih veličina greški za površinske prsline u cevovodima, Monografija III Letnje Škole Mehanike Loma (ured. S. Sedmak), GOŠA-TMF, 1985, str. 319-338.
- 4.23. R.P. Reed et al, Fitness-for-Service Criteria for Pipeline Girth-Weld Quality, Final Report to the U.S.DOT, NBS, Boulder, USA, 1983.
- 4.24. K. Satoh, M. Toyoda, The Incidence of Mechanical Heterogeneity on Fracture Toughness Evaluation of Welds, IIW Doc. X-1031-83, p. 232-248, 1983.
- 4.25 Z. Burzić, S. Sedmak, M. Manjgo, Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva, Integritet i Vek Konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.
- 4.26 T.L. Anderson, Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, Third Edition 2005.
- 5.1 L. Jeremić, B. Đorđević, S.A. Sedmak, A. Sedmak, M. Rakin, M. Arandelović: Uticaj navarivanja plazmom i prisustva karbida na pojavu prslina i mikroprslina, Vol 18, No. 2, 2018, pp. 99-103.
- 5.2 Gordana Bakić, Branislav Đorđević, Lazar Jeremić, Miloš Đukić, Bratislav Rajičić, Simon Sedmak, Aleksandar Sedmak: Influence of exploitation conditions and welding on crack initiation and propagation in pressure vessels, The Third International Conference on FRACTURE MECHANICS " Engineering Applied Fracture Mechanics and Environment", Chlef 27-30 November 2016., Algeria.
- 5.3 Pressure Vessel, 18th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture, Lisbon, Portugal, ISBN: 978-989-20-8548-7, pp 167-170.
- 5.4 Simon Sedmak: Procena integriteta i veka zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće pri dejstvu statičkog i dinamičkog opterećenja, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2019.
- 5.5 L. Jeremić, B. Đorđević, I. Šapić, S. Sedmak, N. Milovanović: Manufacturing and integrity of ammonia storage tanks, STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE, Vol. 20, No 2 (2020), pp. 123–129.
- 5.6 N. Savović, Teorijska, eksperimentalna i numerička analiza parametara mehanike loma zavarenih spojeva, doktorska teza, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.

- 5.7 A. A. Hyacinth, doktorska teza, Mašinski fakultet u Beogradu, 2005.
- 5.8 B. Petrovski, Određivanje preostale nosivosti suda pod pritiskom sa površinskom prslinom, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 1985.
- 5.9 SRPS EN ISO 13480-3: 2017 Industrijski metalni cevovodi-Deo 3: Projektovanje i proračun.
- 5.10 EN PED 14/68- Evropska direktiva za opremu pod pritiskom.
- 6.1 Lazar Jeremić, Aleksandar Sedmak, Blagoj Petrovski, Branislav Đorđević, Simon Sedmak Structural integrity assessment of welded pipeline designed with reduced safety, Technical Gazette, prihvaćeno za objavljivanje, Vol. 27/No. 5, DOI Number: 10.17559/TV-20200413142538.
- 6.2 SRPS EN 13445-3:2010 – Posude pod pritiskom koje nisu izložene plamenu – Deo 3: Projektovanje.
- 9.1 Aleksandar Sedmak¹, Snežana Kirin², Igor Martić², Lazar Jeremić², Ivana Vucetić², Tamara Golubović², Simon A. Sedmak² - Structural integrity and life assessment of pressure vessels - risk based approach, CNNTech 2020: Experimental and Computational Investigations in Engineering pp 274-293, DOI Number: 10.1007/978-3-030-58362-0_16.
- 9.2 Kirin, S., Jeremic, L., Sedmak, A., Martić, I., Sedmak, S., Vučetić, I., Golubović, T. Risk based analysis of RHPP penstock structural integrity, Frattura ed Integrita Strutturale, 31.5.2020, DOI <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.53.27>.
- 9.3 API 581 The standard for quantitative Risk Based Inspection, American Petroleum Institute. 2010
- 9.4 Predrag Đorđević¹, Snežana Kirin², Aleksandar Sedmak³, Emina Džindo⁴, Risk analysis in structural integrity, Structural integrity and life, Vol. 11, No 2 (2011), pp. 135–138.
- 9.5 T. Golubović, A. Sedmak, V. Spasojević Brkić, S. Kirin, I. Rakonjac, Novel risk based assessment of pressure vessels integrity. // Technical Gazette 2018, 25, p.803-807.
- 9.6 I. Vučetić, S. Kirin, A. Sedmak, T. Golubović, M. Lazic, Risk management of a hydro power plant – fracture mechanics approach, Technical Gazette 2019, 26, 428-432.
- 9.7 Ivana Vučetić, Snežana Kirin, Trivun Vučetić, Tamara Golubović, Aleksandar Sedmak, Analiza rizika u slučaju havarije rezervoara za vazduh u rhe BAJINA BAŠTA, Integritet i Vek Konstrukcija, Vol.18, No.1, 2018, str. 3–6.
- 9.8 A. Mahdi, A. Sedmak, S. Kirin, B. Rakicevic, R. Bakic, Industrial safety of pressure vessels - structural integrity and risk assessment point of view, Hemijska Industrija, 2015.
- 9.9 FITNET Fitness-for-service (FFS) Annex, (2008), Volume 2, ISBN 978-3-940923-01-1.

BIOGRAFSKI PODACI AUTORA

Ime i prezime: Lazar Jeremić

Datum rođenja: 13.03.1991.

Mesto rođenja: Gornji Milanovac, Srbija

Školovanje

2015 - Doktorske studije Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, katedra za tehnologiju materijala

2013-2015 Master akademske studije, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, katedra za tehnologiju materijal i opšte mašinske konstrukcije

2010-2013 Osnovne akademske studije Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu

2006-2010 Srednja mašinska tehnička škola „Jovan Žujović“, Gornji Milanovac, Srbija

1998 -2006 Osnovna škola „Momčilo Nastasijević“, Gornji Milanovac, Srbija

Radno iskustvo

2014 -2015 Messer Castolin Beograd, Inženjer zavarivanja

2015 – 2016 Mašinski fakultet stipendista Ministarstva nauke na doktorskim studijama

2016 – 2017 Konstruktor Metal, Beograd, Šef proizvodnje

2017 – 2018 TankMont Beograd, Inženjer zavarivanja

2018 – 2019 Saipem Italy, Offshore inženjer mašinstva

2019 – Istraživač saradnik, Inovacioni centar, Mašinski fakultet Beograd

Prilog 1

Izjava o autorstvu

Potpisan

Lazar Jeremić

broj indeksa

D22/2015

Izjavljujem:

da je doktorska disertacija pod naslovom:

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA PROJEKTOVANIH SA
SMANJENIM STEPENOM SIGURNOSTI

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranta

Beograd, 17.11.2020.

Prilog 2

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Lazar Jeremić

Broj indeksa: D22/2015

Studijski program: Doktorske akademske studije

Naslov rada: PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA PROJEKTOVANIH
SA SMANJENIM STEPENOM SIGURNOSTI

Mentor: Prof. dr Aleksandar Sedmak

Potpisan: Lazar Jeremić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portal **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Navedeni lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranta

Beograd, 17.11.2020.

Prilog 3

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA PROJEKTOVANIH SA SMANJENIM STEPENOM SIGURNOSTI

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranta

Beograd, 17.11.2020.

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.