

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Walid Mukhtar Musrati

Odlukom Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu br. 35/26 od 31.1.2019. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata **Walid Mukhtar Musrati** pod naslovom “**Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena**” / “**Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens**“.

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

**R E F E R A T**

**1. UVOD**

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- **Školske 2014/15** godine kandidat Walid Musrati, master inž. je upisao Doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, profil Inženjerstvo materijala.
- **14.12.2017.** Kandidat Walid Musrati, master inž. je predložio temu doktorske disertacije pod nazivom: “Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena” / “Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens“.
- **28.12.2017.** na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka (br. 35/522 od 28. 12. 2017.) o imenovanju članova Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata Walid Musrati, master inž. pod naslovom Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena” / “Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens“.
- **1.11.2018.** na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka o prihvatanju teme doktorske disertacije pod naslovom Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena” / “Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens“, a za mentora je imenovan dr Marko Rakin, Odluka br. 35/399 od 1.11.2018.

- **26.3.2018.** Veće naučnih oblasti tehničkih nauka donosi odluku po kojoj daje saglasnost na predlog teme "Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena" / "Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens" kandidata Walid Musrati, master inž., Odluka br. 61206-1368/2-18 od 26.3.2018.
- **31.1.2019.** Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Walid Musrati, master inž. pod naslovom "Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena" / "Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens", Odluka br. 35/26 od 31.1.2019.

## 1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Mentor je dr Marko Rakin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, uža naučna oblast Inženjerstvo materijala, koji je na osnovu dosadašnjih objavljenih radova i iskustva kompetentan da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

## 1.3. Biografski podaci o kandidatu

- Walid Mukhtar Musrati je rođen 08. marta 1979. u AL-Khums, Libija.
- 2001. godine je diplomirao na Fakultetu za inženjerstvo Univerziteta Almergheb - usmerenje Mašinski Inženjer.
- U periodu 2006-2008. je studirao i završio Master akademske studije na Fakultetu za mašinstvo i tehnologiju pri Nacionalnom Tehničkom Univerzitetu "Kharkiv Polytechnical Institute" u Ukrajini, na usmerenju Primenjena nauka o materijalima.
- Od 2009. do 2014. godine je radio kao predavač na Fakultetu za inženjerstvo Univerziteta Almergheb.
- Doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu je upisao školske 2014/15. godine.
- Univerzitet u Beogradu je sproveo proces evaluacije stečenih diploma i nostrifikovao ih 20. oktobra 2016.
- Govori engleski jezik, služi se ruskim jezikom.

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### 2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata Walid Musrati napisana je na engleskom jeziku, na 178 strana i sadrži ukupno 197 slika i 8 tabela. Disertacija obuhvata sledeća poglavlja: Uvod (4 strane), Napon, deformacija i lom (10 strana), Elasto-plastična mehanika loma (14 strana), Analiza žilavog loma (20 strana), Predviđanje loma cevovoda (14 strana), Materijali i metode (30 strana), Rezultati i diskusija (72 strane), Zaključak (3 strane), Literatura (117 navoda, 6 strana), Prilog (2 strane). Pored toga, dati su izvodi na srpskom i engleskom jeziku, sadržaj, zahvalnica, kao i biografija kandidata, izjava o autorstvu, izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada i izjava o korišćenju.

## 2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U poglavlju *Uvod* su definisani predmet i cilj rada, aktuelnost istraživanja, kao i naučni doprinos disertacije.

Teorijskom delu disertacije pripadaju poglavlja: *Napon, deformacija i lom; Elasto-plastična mehanika loma* i *Analiza žilavog loma*. Data su osnovna razmatranja o tenzorima napona i deformacije u deformabilnom telu izloženom dejstvu spoljnog opterećenja. S obzirom na primenu kriterijuma plastičnog tečenja i otkaza nosivosti materijala mikromehaničkim modelima prevashodno za mehanizam žilavog loma (baziranih na modifikovanom Gursonovim kriterijumu), dati su osnovni izrazi za sferni i devijatorski deo tenzora napona. Cilj disertacije je sveobuhvatna analiza integriteta materijala cevovoda, te su osim razmatranja oštećenja i loma materijala cevovoda diskutovani i uslovi koji mogu dovesti do pojave plastičnog kolapsa strukture. Takođe, dat je kratak istorijski prikaz razvoja naučne oblasti mehanike loma. Posebno poglavlje posvećeno je prikazu metoda i parametara elasto-plastične mehanike loma (EPML), imajući u vidu da je mehanizam žilavog loma uočen u svim razmatranim materijalima, uključujući i metal šava šavnih cevi. Kako je žilav lom po pravilu praćen plastičnim deformisanjem materijala, diskutovan je uticaj polja napona i deformacije na otpornost prema lomu. Prikazani su najčešće korišćeni parametri EPML:  $J$  integral, otvaranje usta prsline (*crack mouth opening displacement* - CMOD) i otvaranje vrha prsline (*crack tip opening displacement* - CTOD). Takođe, predstavljen je koncept  $\delta_5$  za određivanje CTOD, koji je primenjen i u eksperimentalnom i u numeričkoj analizi u ovoj disertaciji. U poglavlju *Analiza žilavog loma*, razvoj oštećenja do loma praćenog plastičnim deformisanjem opisan je kroz sve tri faze nastanka žilavog loma: nastanak, rast i spajanje šupljina - kako u materijalu bez inicijalnih prsline, tako i u materijalu sa inicijalnim prslinama. Dat je pregled mikromehaničkih modela za predviđanje žilavog loma, nespregnutog i spregnutog pristupa. Naglasak je na modelima spregnutog pristupa koji za osnovu imaju Gursonov plastični potencijal (kriterijum plastičnog tečenja), imajući u vidu da model primenjen u ovoj disertaciji pripada ovoj grupi. Takođe, prikazane su tehnike za numeričko modeliranje razvoja makroskopskog oštećenja u materijalu - rasta prsline.

U poglavlju *Predviđanje loma cevovoda* razmotrena je pojava i vrste oštećenja koje nastaju u materijalu cevovoda tokom proizvodnje, montaže i eksploatacije, kao mesta nastanka makroskopskog oštećenja. Dat je prikaz i diskusija istraživanja iz literature kojima su predložene nestandardne epruvete za ispitivanje otpornosti prema lomu cevovoda. Primeri su: zakrivljene kompaktne epruvete za zatezanje CCT, epruvete za zatezanje SENT (*Single edge notch tension*), kompaktne cevne epruvete, zakrivljene epruvete za savijanje i dr. Razmotrene su njihove prednosti i loše strane, sa stanovišta izrade, postupka ispitivanja i rezultata ispitivanja. Može se reći da se SENT epruveta izdvaja po svojoj pogodnosti i jednostavnosti izrade i ispitivanja, ali isključivo za oštećenja u obimnom pravcu - sve epruvete sa inicijalnom prslinom ili žlebom u aksijalnom pravcu se odlikuju složenim postupkom izrade i/ili ispitivanja.

Poglavlje *Materijali i metode* sadrži kratak prikaz metoda ispitivanja (eksperimentalnih i numeričkih tehnika) i pripreme uzoraka/epruveta za ispitivanje, što je detaljnije dato u nastavku. Pre svega, dat je pregled materijala ispitivanih u disertaciji: niskolegiraniog čelika povišene čvrstoće i dva čelika za izradu opreme pod pritiskom. Prikazane su osnovne tehnike određivanja tvrdoće materijala šavnih i bešavnih cevi, kao i uzorci koji su ispitivani u disertaciji. Opis postupka kvantitativne mikrostrukturne analize u poliranom stanju je takođe praćen prikazom uzoraka isečenih iz ispitivanih materijala. Diskutovan je postupak jednoosnog zateznog ispitivanja i dobijanje krivih nominalni napon - nominalna deformacija i stvarni napon - stvarna deformacija, koja se koristi u analizi metodom konačnih elemenata u oblasti elasto-plastičnog deformisanja materijala. Prikazan je postupak eksperimentalnih ispitivanja mehanike loma, kao i geometrije standardnih epruveta za savijanje i zatezanje. Objašnjen je koncept beskontaktnog merenja polja pomeranja i deformacija (iz kojih se u elastičnoj oblasti može odrediti čak i naponsko stanje) primenom stereometrijskog sistema, koji podrazumeva primenu dve sinhronizovane kamere visoke rezolucije i softverskog paketa; u disertaciji je korišćen Gom Aramis. Analiza prelomnih površina urađena je primenom stereometrijskog mikroskopa, što je takođe opisano u ovom poglavlju. Ovo je

neophodno da bi se izmerila konačna dužina prsline nakon loma epruvete, neophodna za formiranje krive otpornosti prema rastu prsline. Konačno, posebna pažnja posvećena je eksperimentalnom ispitivanju i numeričkoj analizi epruveta oblika prstena izloženih savijanju. Date su dimenzije grupa ispitivanih uzoraka (uz odgovarajući šematski prikaz i tehnički crtež), i opisan postupak izrade i ispitivanja. Prikazani su dvodimenzionalni i trodimenzionalni numerički modeli konačnih elemenata epruveta oblika prstena (EOP), epruveta za savijanje u tri tačke (SENB) i kompaktnih epruveta za zatezanje (CT), koji su razmatrani sa ili bez primene mikromehaničkog modela zasnovanog na Gursonovom kriterijumu plastičnog tečenja, oštećenja i loma materijala, primenom licenciranog softverskog paketa Abaqus.

U poglavlju *Rezultati i diskusija* dat je detaljan prikaz svih rezultata dobijenih u okviru rada na disertaciji i njihova analiza, sa posebnim osvrtom na primenljivost rezultata u određivanju integriteta novih cevovoda i cevovoda iz eksploatacije. U eksperimentalnom delu prikazani su rezultati ispitivanja epruveta oblika prstena izrađenih iz šavnih i bešavnih čeličnih cevi, kao i onih izrađenih iz ploča. Takođe, dati su rezultati ispitivanja tvrdoće šavnih i bešavnih cevi, zateznih ispitivanja i analize mikrostrukture. Kvantitativnom mikrostrukturnom analizom uzoraka u poliranom stanju su dobijeni mikrostrukturni parametri, od kojih je zapreminski udeo nemetalnih uključaka korišćen u okviru mikromehaničke analize oštećenja i loma. Kvalitativna mikrostrukturna analiza u nagriženom stanju omogućila je procenu heterogenosti mikrostrukture u osnovnom materijalu i metalu šava šavnih cevi; upravo na osnovu ove heterogenosti i promene dimenzija zrna u zoni stapanja, određena je širina šava koja je korišćena u numeričkim proračunima. Numerički proračuni metodom konačnih elemenata (u softverskom paketu Simulia Abaqus) primenjeni su u analizi dva mehanizma otkaza cevi - žilavog loma i plastičnog kolapsa. Za predviđanje nastanka i razvoja žilavog loma korišćen je mikromehanički model CGM (*Complete Gurson Model*), tj. kriterijum oštećenja zasnovan na Gursonovom plastičnom potencijalu i Tomasonovoj definiciji otkaza nosivosti materijala. Mikromehanički parametri određeni na CT epruveti isečenoj iz bešavne cevi uspešno su primenjeni u predviđanju loma epruvete oblika prstena, tj. postignuta je prenosivost parametara. Takođe, prenosivost je postignuta i u slučaju SENB (Single edge notch bending) epruveta i epruveta oblika prstena isečenih iz ploča. Plastični kolaps je razmatran primenom elasto-plastičnog ponašanja materijala, a kriterijom otkaza je definisan preko von Misesovog ekvivalentnog napona. Za oba oblika otkaza, utvrđen je uticaj geometrije epruvete i početnog koncentrata napona, kao i heterogenosti materijala u slučaju šavnih cevi, na otpornost prema lomu i plastičnom kolapsu. Prikazan je postupak za određivanje vrednosti korekcionog faktora  $\eta_{plast}$ , koji se koristi za izračunavanje  $J$  integrala, i izračunate su vrednosti za različite geometrije epruveta oblika prstena (prečnik i debljinu zida) i oblik i dimenzije koncentrata napona (žleb i prslina različitih dužina).

U poglavlju *Zaključak* sumirani su dobijeni rezultati i dati zaključci izvedeni na osnovu izvršenih ispitivanja. Poglavlje *Literatura* sadrži sve citirane reference, uključujući publikovane radove proistekle iz istraživanja u okviru ove doktorske disertacije.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### 3.1. Savremenost i originalnost

Na osnovu pregleda novije literature, može se reći da sprovedena istraživanja u okviru ove doktorske disertacije spadaju u veoma aktuelno polje istraživanja u oblasti karakterizacije oštećenja i loma komponenata opreme pod pritiskom, sa ciljem da se obezbedi integritet i siguran rad u eksploataciji.

Karakterizacija materijala cevovoda je bila i još uvek je predmet mnogih objavljenih studija i istraživanja: teorijskih, iz inženjerske prakse (studije slučaja), kao i onih gde se detaljna analiza otkaza koristi da bi se otkrio mehanizam oštećenja i poboljšao integritet cevovoda. Osnovni problem je što cevi, posebno tankozidne, ne ispunjavaju uslove u pogledu geometrije za pripremu

standardnih epruveta koje se koriste u mehanici loma - pre svega kompaktnih epruveta za zatezanje (*Compact Tensile Specimens*, CT) i epruveta za ispitivanje u tri tačke sa ivičnom prslinom (*Single-Edge Notch Bend Specimens*, SENB). Stoga se izvode istraživanja koja imaju za cilj nalaženje novih geometrija epruveta pogodnijih za određivanje otpornosti prema lomu cevovoda od standardnih (kratak prikaz je dat u ovoj disertaciji, u poglavlju 5). Za prsline u obimnom pravcu, u više studija je pokazano da je epruveta za zatezanje sa ivičnom prslinom SENT pogodnija za procenu razvoja loma u zidu cevi od epruvete za savijanje u tri tačke SENB ukoliko je koncentrador napona u obimnom pravcu. Geometrija SENT epruveta je pogodna za ispitivanje loma cilindričnih struktura izloženih zatezanju; primer su vertikalne cevi veće dužine opterećene sopstvenom težinom. Drugi primeri epruveta koje sadrže prsline u uzdužnom pravcu cevi se takođe mogu naći u literaturi, kao što su zakrivljene kompaktne epruvete za zatezanje (CCT) ili različite nestandardne konfiguracije za zatezanje i savijanje. Međutim, one se po pravilu karakterišu relativno kompleksnom pripremom i / ili procedurom testiranja. Upravo u tome leži jedna od dobrih strana epruveta oblika prstena, za koje je u ovom radu pokazano da daju pouzdane i ponovljive rezultate, i to uz jednostavan postupak primene i ispitivanje koje se gotovo u potpunosti izvodi na način definisan standardima za epruvete za savijanje u tri tačke. U novije vreme, ove epruvete su bile predmet više objavljenih radova; pokazano je da je potrebno razumeti i analizirati veći broj primera ispitivanja ovih uzoraka, kako na novim, tako i na korišćenim cevima, da bi se mogle primeniti prednosti primene ovih geometrija. Međutim, fokus dosadašnjih istraživanja je bio na korelaciji rezultata dobijenih eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima novom geometrijom - epruveta oblika prstena (EOP), i epruveta za savijanje u tri tačke (SENB). S obzirom na isti karakter spolnog opterećenja u oba slučaja - savijanje, nedavno predložena geometrija u obliku cevnog prstena se često označava i kao *pipe-ring notch bend specimen* (PRNB) - odnosno cevni prsten sa žlebom predviđen za ispitivanje savijanjem.

Iz obrazloženja predložene teme doktorske disertacije, prikaza korišćene literature, kao i objavljenih radova kandidata, uočava se dobro poznavanje savremenih svetskih trendova u oblasti istraživanja.

### 3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji citirano je 117 literaturnih navoda, koji su omogućili da se prikaže stanje u ispitivanoj oblasti, kao i aktuelnost problematike. Veliki deo čine noviji radovi u relevantnim međunarodnim časopisima. Navedeni radovi su korišćeni kako prilikom planiranja eksperimentalnog rada, tako i pri tumačenju i analizi rezultata istraživanja, diskusiji i izvođenju zaključaka. Tokom izrade teze, detaljno je pregledana literatura koja se odnosi na ispitivanje loma i oštećenja metalnih materijala i struktura, uključujući cevovode, kao i literatura koja se odnosi na mikromehaničku analizu homogenih i heterogenih materijala. Međutim, u literaturi su navedene i knjige i naučni radovi ranijeg datuma, koji predstavljaju polaznu osnovu za eksperimentalnu i numeričku analizu oštećenja epruveta oblika prstena. U okviru literature nalaze se i reference kandidata, proistekle iz istraživanja u vezi sa ovom disertacijom i koje su objavljene u međunarodnim časopisima i na konferencijama.

### 3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Imajući u vidu da metode koje se uobičajeno koriste u ispitivanjima mehanike loma nemaju mogućnost kvantitativnog uzimanja u obzir razvoja oštećenja materijala mehanizmom žilavog loma, u ovoj disertaciji primenjena mikromehanička analiza. Ona obuhvata niz eksperimentalnih i numeričkih metoda (pre svega zasnovanih na proračunima metodom konačnih elemenata - MKE) koje imaju za cilj kvantitativni opis sve tri faze žilavog loma - nastanak, rast i spajanje šupljina. Eksperimentalna analiza obuhvata mehaničku karakterizaciju materijala i ispitivanja mehanike loma, ali i kvantitativnu mikrostrukturnu analizu. Imajući u vidu da se vrednosti ključnih promenljivih (deformacija, napon, parametri oštećenja) razmatraju na lokalnom nivou, primenjena metodologija se može svrstati u oblast lokalnog pristupa lomu. Cilj je sveobuhvatna analiza

oštećenja materijala pre svega tankozidnih cevovoda mehanizmom žilavog loma, od nastanka šupljina, preko njihovog rasta do završne faze - spajanja šupljina koje dovodi do loma.

Metodologija istraživanja u okviru disertacije obuhvatila je eksperimentalna ispitivanja epruveta u obliku prstena, i to: sečenih iz punog materijala - čelika povišene čvrstoće i sečenih iz tankozidnih šavnih i bešavnih cevi od čelika za izradu cevovoda pod pritiskom. Kada se govori o izradi epruveta, treba naglasiti da koristi od njihove primene uključuju mnogo jednostavniju izradu, kao i činjenicu da su isečene od istog materijala kao i same cevi; na primer, pri ispitivanju cevi iz eksploatacije sečenjem EOP se dobija uzorak koji verno predstavlja termo-mehaničke uslove proizvodnje, montaže i eksploatacije cevovoda.

Inicijalno oštećenje (žleb ili zamorna prslina) su na svim epruvatama oblika prstena urađeni u uzdužnom (aksijalnom) pravcu, kao kritičnom kod cilindričnih struktura za razvoj oštećenja do loma. Varirana je dužina inicijalnog oštećenja ( $a/W$ ), ali i ostale geometrijske mere epruveta: prečnik  $D$ , širina  $W$  i debljina  $B$ . Pripremljeni uzorci su savijani u tri tačke na univerzalnoj hidrauličnoj kidalici na kojoj je simultano mereno otvaranje usta prsline (*Crack Mouth Opening Displacement* CMOD) i otvaranje vrha prsline (CTOD - preko  $\delta_5$  koncepta): i) korišćenjem COD (*Crack Opening Displacement*) davača na jednom od dva koncentrata napona na epruveti i ii) primenom beskontaktnih stereometrijskih merenja sa dve sinhronizovane kamere i odgovarajućeg softverskog rešenja za obradu podataka Aramis<sup>TM</sup> proizvođača GOM. Na polomljenim uzorcima urađena je fraktografska analiza na snimcima visoke rezolucije i određen rast prsline na osnovu analize prelomne površine, merenjem početne dužine prsline  $a_0$  i dužine prsline pri lomu  $a_F$ , uz korišćenje postupka normalizacije u skladu sa standardom ASTM E1820. Upravo ovo je neophodan uslov za formiranje krivih otpornosti prema lomu.

Zatezne osobine materijala su određene na standardnim glatkim epruvetama kružnog poprečnog preseka, izrađenim iz šavnih i bešavnih cevi, kao i iz ploča niskolegiranog čelika povišene čvrstoće. Kod šavnih cevi uočena je znatno viša čvrstoća metala šava u poređenju sa osnovnim metalom. Sa druge strane, osnovni metal šavne cevi i bešavne cevi su pokazali slično ponašanje.

S obzirom na činjenicu da mikromehanička analiza podrazumeva kombinovani eksperimentalno-numerički postupak, proračuni su urađeni primenom metode konačnih elemenata (MKE) - trodimenzionalna analiza. Kod prvog seta EOP uzoraka, sečenih iz ploče, cilj je bio verifikacija mikromehaničkih parametara razvoja oštećenja do loma - pre svega zapreminskog udela šupljina  $f$ , kritične vrednosti ovog parametra  $f_c$  i njegove vrednosti pri lomu  $f_F$ . Primenjen je takozvani spregnuti mikromehanički pristup, gde je promenljiva  $f$  deo konstitutivnog modela plastičnog tečenja materijala. Primenjen je model CGM, zasnovan na Gursonovom kriterijumu tečenja kao pogodnom za analizu žilavog loma čelika. Potom, isti pristup je primenjen i u analizi loma epruveta isečenih iz bešavnih i šavnih cevi, kao i na CT epruvetama manjih dimenzija (*sub-sized*) koje je bilo moguće pripremiti iz jedne od razmatranih bešavnih cevi. Mikromehaničkom analizom je razmotren i uticaj heterogenosti materijala kod EOP uzoraka isečenih iz šavnih cevi na otpornost prema lomu. Određena je razlika u ponašanju pri lomu osnovnog metala i metala šava, kao i uticaj ometenog razvoja deformacije (*constraint effect*) na otkaz i lom. Da bi se primenila mikromehanička analiza, na metalografski pripremljenim uzorcima urađena je kvantitativna mikrostrukturna analiza radi određivanja sadržaja (udela) nemetalnih uključaka u čeliku i srednjeg slobodnog puta između njih.

Na osnovu eksperimentalne analize, obrade eksperimentalnih rezultata i u sprezi sa numeričkom analizom, formirane su krive: sila - otvaranje usta/vrha prsline ( $F$ -CMOD/CTOD), krive otpornosti prema rastu prsline (CTOD- $\Delta a$ ), zavisnost ekvivalentnog napona, plastične deformacije i troosnosti napona od udaljenosti od vrha koncentrata napona, kao i razvoj/rast zapreminskog udela šupljina u ligamentu ispred vrha prsline primenom mikromehaničkog modela. Urađena je parametarska studija u kojoj je definisan uticaj dimenzija i oblika koncentrata napona na vrednost troosnosti napona, kao ključne veličine za nastanak i razvoj žilavog loma u materijalu. Takođe, određene su vrednosti korekcionog faktora za ispitivane geometrije oblika prstena  $\eta_{plast}$  koji se koristi za izračunavanje  $J$  integrala, preko zavisnosti promene spoljne sile od CMOD.

Pojava plastičnog kolapsa razmotrena je preko dijagrama zavisnosti graničnih opterećenja od karakterističnih dimenzija epruvete. Plastični kolaps je u eksperimentalnoj analizi predviđen primenom metode dvostrukog nagiba elastičnog dela krive sila - pomeranje napadne tačke. U numeričkim proračunima, plastični kolaps je analiziran preko praćenja plastičnog deformisanja ligamenta ispred vrha žleba/prslina; uslov otkaza je plastično deformisanje celog ligamenta, definisano dostizanjem vrednosti ekvivalentne plastične deformacije od 0.2%.

Detaljno je razmotren uticaj svih geometrijskih mera epruvete oblika prstena, kao i oblika i dimenzija koncentrata napona, na otpornost prema lomu i plastičnom kolapsu.

Iz navedenog se može zaključiti da je u okviru ove disertacije sprovedena postupna, opsežna i temeljna karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda, primenom eksperimentalno-numeričke metodologije neophodne da se na adekvatan način sagledaju svi uticajni faktori.

### 3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Pregledom literature iz oblasti istraživanja, kao i rezultata doktorske disertacije, može se zaključiti da je ostvaren značajan doprinos u karakterizaciji oštećenja cilindričnih struktura mehanizmom žilavog loma. Rezultati istraživanja potvrđeni su objavljivanjem radova u međunarodnim časopisima, kao i prezentovanjem dobijenih rezultata na naučnim skupovima.

Ovom disertacijom je ispitan razvoj oštećenja i lom tankozidnih čeličnih cevi, gde je odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika blizak broju 1; drugim rečima tankozidnim cevima u pravom smislu tog značenja. Ovakve cevi, zbog smanjene mogućnosti pojave ravnog stanja deformacije, a i male mase, imaju značajnu primenu ne samo u hemijskoj industriji, već i šire. Ovo podrazumeva obimnu eksperimentalnu i numeričku analizu kako bešavnih, tako i šavnih (uzdužno zavarenih) cevi. Definisano je set parametara u mikromehaničkom modelu koji je uspešno korišćen za različite analizirane geometrije (postignuta je prenosivost parametara).

Analiza različitih koncentrata napona, žleba i prsline, je pokazala prednosti i mane ovih geometrija. Iako je troosnost naponskog stanja znatno niža u slučaju žleba, što je kvantifikovano parametarskom studijom na seriji modela epruveta oblika prstena, prednosti žleba su pravilan oblik konačne prsline i nešto veći rast prsline mehanizmom žilavog loma. Epruvete sa zamornom prsline su po pravilu imale nepravilan front početne prsline, što je prikazano na više primera u poglavlju Rezultati i diskusija. I jedan i drugi oblik koncentrata napona dali su zadovoljavajuću ponovljivost rezultata, kao i malu zavisnost od dužine žleba/prsline, debljine zida i odnosa širine prstena i debljine zida. Imajući u vidu sve navedeno, a pre svega ponovljivost rezultata i jednostavnost izrade, epruvete sa žlebom su pogodnije za brzo i efikasno poređenje više materijala, na primer kada je potrebno izabrati materijal za novi cevovod, ili kada je potrebno proceniti preostalu nosivost cevi koja je bila u eksploataciji.

Osnovni rezultati se mogu sumirati na sledeći način: i) razvijen je kombinovani eksperimentalno-numerički postupak zasnovan na mikromehaničkoj analizi predviđanja razvoja oštećenja do loma materijala cevovoda na epruvetama koje su pogodnije za primenu u inženjerskoj praksi ii) metodologija je optimizovana u cilju primene u određivanju strukturnog integriteta cevovoda u različitim granama industrije, iii) određen je uticaj svih geometrijskih mera epruvete i koncentrata napona, kao i heterogenosti materijala šavnih cevi, na otpornost prema lomu i plastičnom kolapsu, pri čemu su dobijeni pouzdani i ponovljivi rezultati.

Budući da je karakterizacija loma i oštećenja materijala cevovoda izuzetno aktuelna tema, istraživanja sprovedena u okviru ove doktorske disertacije daju značajan doprinos boljem razumevanju, kao i projektovanju sa ciljem prevencije otkaza pod dejstvom opterećenja u eksploataciji.

### 3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

U toku izrade doktorske disertacije, kandidat je osposobljen da samostalno napravi literaturni pregled, pripremi i realizuje eksperimente, kao i da analizira dobijene rezultate. Tokom izrade doktorske disertacije savladao je različite tehnike ispitivanja, pri čemu treba naglasiti pre svega rad u softverskom paketu za proračune metodom konačnih elemenata Simulia Abaqus (u kome su urađeni svi numerički proračuni u okviru disertacije, uključujući i one koji podrazumevaju primenu mikromehaničkog modela CGM). Na osnovu dosadašnjeg rada i postignutih rezultata, Komisija smatra da kandidat poseduje kvalitete neophodne za samostalni naučno-istraživački rad.

## **4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS**

### 4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Istraživanja u okviru ove disertacije su kao rezultat dala sveobuhvatno razumevanje ponašanja epruveta oblika prstena u uslovima otkaza mehanizmom žilavog loma i plastičnog kolapsa, sa ciljem da se ispitivanjem ovih geometrija proceni integritet cevovoda izloženih unutrašnjem pritisku. Osnovni naučni doprinosi disertacije:

- Verifikovana je primenljivost nove epruvete oblika prstena na šavnim i bešavnim tankozidnim cevima različitih dimenzija i sa različitim oblikom i veličinom inicijalnog oštećenja.
- Određen je uticaj geometrije epruvete i koncentratora napona, kao i heterogenosti materijala na otpornost prema lomu i plastičnom kolapsu, za širok raspon dimenzija epruveta i koncentratora napona, od kojih se neke nalaze van opsega najčešće korišćenih u ispitivanjima mehanike loma.
- Dokazana je ponovljivost rezultata, pre svega analizom krivih otpornosti prema rastu prsline na više različitih setova epruveta sličnih dimenzija.
- Postignuta je prenosivost mikromehaničkih parametara - početnog zapreminskog udela šupljina i dimenzija konačnih elemenata u ligamentu, za serije epruveta oblika prstena. Stoga, ovi parametri na odgovarajući način opisuju razvoj oštećenja u materijalu i mogu se koristiti u predviđanju otkaza realnih struktura.
- Razvijen je eksperimentalno-numerički postupak za određivanje žilavosti loma pri ravnom stanju deformacije primenom mikromehaničke analize, sprežanjem eksperimentalnih podataka dobijenih ispitivanjem tankozidnih epruveta i numeričkih modela standardnih epruveta veće debljine (kakve nije moguće izraditi iz razmatranih cevi).
- Definisana je celovita procedura za izradu, ispitivanje i numeričku analizu otkaza epruveta oblika prstena izloženih spoljašnjem opterećenju - savijanju.

### 4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Istraživanja u okviru disertacije koncipirana su na osnovu definisanih ciljeva i detaljne analize literature. U poređenju sa drugim nestandardnim epruvetama predloženim u novijoj literaturi, kao i sa prethodnim istraživanjima epruveta oblika prstena, treba posebno naglasiti da su razmatrane tankozidne cevi sa veoma malim odnosom spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika. Eksperimentalne metode određivanja otpornosti prema lomu i oštećenju metalnih materijala podrazumevaju korišćenje uzoraka relativno velike debljine, što predstavlja problem pri ispitivanju tankozidnih konstrukcija (uključujući cevovode) i stoga razvoj adekvatne geometrije za ispitivanje tankozidnih struktura ima veliki značaj u inženjerskoj praksi. Kompleksna trodimenzionalna geometrija epruvete oblika prstena predstavlja problem pri formiranju početne zamorne prsline, pa je posebna pažnja posvećena analizi loma epruveta sa žlebom kao koncentratorom napona, da bi se pokazalo da ovaj pristup može dati merodavne rezultate. Takođe, osim analize loma bešavnih (makroskopski



homogenih) cevi, ispitivane su i šavne uzdužno zavarene cevi, kod kojih postoji heterogenost mikrostrukture i mehaničkih osobina u zoni zavarenog spoja.

Spregnuti eksperimentalno-numerički postupak predviđanja otkaza je u punoj meri uključio numeričku analizu kao alat za određivanje veličina koje nije moguće odrediti isključivo eksperimentalno. Rezultatima istraživanja je potvrđeno da je epruveta oblika prstena merodavna za ispitivanje otkaza (loma i plastičnog kolapsa) tankozidnih struktura sa aksijalnim oštećenjima i proceni njihovog integriteta, pri čemu su dobijeni pouzdani i ponovljivi rezultati u širokom opsegu dimenzija strukture i koncentratora napona.

#### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Kandidat Walid Musrati je rezultate istraživanja ove doktorske disertacije potvrdio objavljivanjem radova u vrhunskom međunarodnom časopisu, međunarodnom časopisu i međunarodnom časopisu van SCI liste, kao i prezentovanjem radova na naučnim skupovima. Iz disertacije je proistekao jedan rad objavljen u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21), jedan rad u međunarodnom časopisu (M23), jedan rad u međunarodnom časopisu van SCI liste (M51), jedno saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34) i jedno saopštenje sa nacionalnog skupa štampano u celini (M63).

##### Kategorija M21:

1. **Musraty, W.**, Međo, B., Gubeljaka, N., Likeb, A., Cvijović-Alagić, I., Sedmak, A., Rakin, M.: Ductile Fracture of Pipe-Ring Notched Bend Specimens - Micromechanical Analysis, - *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 175, pp. 247-261, 2017 (**IF=2.580**) (ISSN 0013-7944).

##### Kategorija M23:

1. **Musraty, W.**, Međo, B., Gubeljaka, N., Štefane, P., Radosavljević, Z., Burzić, Z., Rakin, M.: Seam Pipes for Process Industry - Fracture Analysis by using Ring-Shaped Specimens, - *Hemijska industrija*, vol. 72, no. 1, pp. 39-46, 2018 (**IF 2017 = 0.591**) (ISSN 0367-598X).

##### Kategorija M51:

1. **Musrati, W.**, Međo, B., Gubeljaka, N., Štefane, P., Veljić, D., Sedmak, A., Rakin, M.: Fracture Analysis of Axially Flawed Ring-Shaped Bending Specimen, -*Procedia Structural Integrity*, vol. 13, pp. 1828-1833, 2018 (ISSN 2452-3216).

##### Kategorija M34:

1. **Musraty, W.**, Međo, B., Rakin, M., Gubeljaka, N., Matvienko, Y., Arsić, M., Sedmak, A.: "Prediction of Pipe Ring Specimen Failure Conditions," -*Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F16)*, Dubrovnik, Croatia, 2016., pp. 293-294

##### Kategorija M63:

1. Međo, B., **Musrati, W.**, Gubeljaka, N., Štefane, P., Arsić, M., Rakin, M.: "Određivanje otpornosti prema lomu materijala cevovoda primenom epruveta oblika prstena," -*Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji - Procesing*, Bajina Bašta, Srbija, 2018., vol. 31, no. 1, pp. 35-40

## 5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu svega iznetog, Komisija smatra da doktorska disertacija kandidata Walid Musrati, pod naslovom: **“Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena” / “Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens“**, predstavlja značajan i originalan naučni doprinos u oblasti Inženjerstva materijala, što je potvrđeno objavljivanjem radova u vrhunskom međunarodnom časopisu, međunarodnom časopisu i međunarodnom časopisu van SCI liste, kao i prezentovanjem rezultata na naučnim skupovima.

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu da podnetu doktorsku disertaciju, pod naslovom: **“Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena” / “Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens“**, kandidata Walid Musrati prihvati, izloži na uvid javnosti i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, kao i da nakon završetka ove procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije.

U Beogradu, 25.2.2019. godine

### ČLANOVI KOMISIJE

---

Dr Marko Rakin, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Bojan Međo, docent  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Nenad Gubeljak, redovni profesor  
Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet

---

Dr Slaviša Putić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Ivana Cvijović Alagić, naučni saradnik  
Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke “Vinča”