

ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ
ФАКУЛТЕТ
35/39
(Број захтева)

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
(Назив већа научне области и коме се захтев упућује)

15.03.2018.
(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације:

„Карактеризација оштећења и лома материјала цевовода коришћењем епрувета облика прстена (Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens)“

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

WALID MUKHTAR MUSRATI, мастер инжењер

2. Назив и седиште факултета на коме је стекао високо образовање: **Решењем ректора Универзитета у Београду број 06-61301-5243/6-14 од 20.10.2016. године студенту се признаје високошколска исправа другог нивоа високог образовања стечена на високошколској установи Народни технички универзитет у Харкову, Политехнички институт, Харков, Украјина, чиме је стекао право на наставак образовања на Универзитету у Београду, Технолошко-металуршки факултет, студијски програм докторских академских студија (Инжењерство материјала).**

3. Година дипломирања: /

4. Назив и седиште факултета на коме је стекао мастер образовање: /

5. Година одбране мастер рада: /

Студент је уписан на докторске академске студије шк. 2014/2015. године.

Обавештавамо Вас да је **Наставно-научно веће**, на седници одржаној **22.02.2018. године** размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем
2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације
3. Подаци о ментору.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Walid Mukhtar Musrati

Име и презиме ментора: Марко Ракин

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. **M. Rakin**, B. Medjo, N. Gubeljak, A. Sedmak, Micromechanical assessment of mismatch effects on fracture of high-strength low alloyed steel welded joints. Engineering Fracture Mechanics, 2013, vol. 109, pp. 221-235. ISSN 0013-7944, IF 2013 = 1.662
2. B. Younise, **M. Rakin**, N. Gubeljak, B. Medjo, A. Sedmak, Effect of material heterogeneity and constraint conditions on ductile fracture resistance of welded joint zones – Micromechanical assessment, Engineering Failure Analysis, 2017, vol. 82, pp. 435-445. ISSN 1350-6307, IF 2016=1.676
3. B. Medjo, **M. Rakin**, N. Gubeljak, Y. Matvienko, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, A. Sedmak, Failure resistance of drilling rig casing pipes with an axial crack. Engineering Failure Analysis, 2015, vol. 58, pp. 429-440. ISSN 1350-6307, IF 2015 = 1.358
4. B. Medjo, **M. Rakin**, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, M. Zrilić, S. Putić, Determination of the load carrying capacity of damaged pipes using local approach to fracture. Materials Transactions - JIM, 2012, 53, pp. 185-190. ISSN 1345-9678, IF 2012 = 0.588, Materials Science, Multidisciplinary (2012: 186/241) Metallurgy and Metallurgical Engineering (2012: 33/76)
5. **M. Rakin**, N. Gubeljak, M. Dobrojević, A. Sedmak, Modelling of ductile fracture initiation in strength mismatched welded joint. Engineering Fracture Mechanics, 2008, vol. 75, pp. 3499-3510 ISSN 0013-7944, IF 2008 = 2.031

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно

се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односно дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум: 12. 02. 2018.

М.П.

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

ДП

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 104. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 40. Статута ТМФ-а и чл. 32. Правилника о докторским студијама Факултета, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 22.02.2018. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата
за израду докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобрава израда докторске дисертације **Walid Mukhtar Musrati**, мастер инж., под називом: „**Карактеризација оштећења и лома материјала цевовода коришћењем епрувета облика прстена (Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens)**“.

Одобрава се докторанду да докторску дисертацију пише и брани на енглеском језику.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За ментора се одређује др Марко Ракин, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду на сагласност, кандидату, ментору, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU-**

Predmet: podobnost teme i kandidata Walid Mukhtar Musrati, master inženjera, za izradu doktorske disertacije.

Odlukom Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu br. 35/522 od 28. 12. 2017. godine, imenovani smo za članove Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata Walid Mukhtar Musrati, master inženjera, za izradu doktorske disertacije i naučne zasnovanosti teme:

Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena

Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens

Na osnovu materijala priloženog uz Zahtev kandidata, Komisija podnosi sledeći

I Z V E Š T A J

1. Podaci o kandidatu

1.1. Biografija kandidata

- 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-te 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 20.10.2016.
- Govori engleski jezik.

Položeni ispiti i ostvareni bodovi u toku doktorskih studija	ESPB	Ocena
1. Odabrana poglavlja numeričke analize	5	10
2. Fizičko-mehanička ispitivanja materijala - viši kurs	5	10
3. Termodinamika čvrstog stanja	5	10
4. Hemijska kinetika	5	7
5. Inženjerstvo površina	5	10
6. Nanostrukturni metalni materijali	5	10
7. Nauka o materijalima i inženjerstvo materijala	6	10
8. Viši kurs fizike čvrstoće i plastičnosti	5	9
9. Otpornost materijala	5	10
10. Metoda konačnih elemenata u inženjerstvu materijala	4	10
11. Kvantifikacija vizuelnih informacija	5	10
12. Završni ispit	30	10
Ukupno ESPB	85	
Prosečna ocena	9.75	

1.2. Stečeno naučno-istraživačko iskustvo

Iz rezultata dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada kandidata na predloženoj temi doktorske disertacije proizašla su 3 (tri) rada objavljena u časopisima međunarodnog značaja, od kojih je 1 (jedan) rad štampan u vodećem međunarodnom časopisu (M21), 1 (jedan) u međunarodnom časopisu i 1 (jedan) u časopisu međunarodnog značaja verifikovanom od strane Matičnog odbora (M24). Takođe, kandidat ima i 2 (dva) saopštenja sa naučnih skupova međunarodnog značaja objavljena u izvodu.

Objavljeni naučni radovi i saopštenja

M20. Radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja

M21, Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. **W. Musraty**, B. Međo, N. Gubeljak, A. Likeb, I. Cvijović-Alagić, A. Sedmak, M. Rakin: *Ductile fracture of pipe-ring notched bend specimens - micromechanical analysis. Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 175 (2017) pp. 247-261, ISSN 0013-7944, IF 2015 = 2.024, Mechanics (2015: 33/135)

M23, Rad u međunarodnom časopisu

1. **W. Musraty**, B. Međo, N. Gubeljak, P. Štefane, Z. Radosavljević, Z. Burzić, M. Rakin: *Seam pipes for process industry - fracture analysis by using ring-shaped specimens.*

M24 Radovi međunarodnog značaja verifikovani posebnom odlukom

1. R. Jovičić, S. Sedmak, U. Tatić, U. Lukić, **W. Musraty**: *Stress state around imperfections in welded joints*. Structural Integrity and Life / Integritet i vek konstrukcija, Vol. 15/1 (2015) pp. 27-29, ISSN 1451-3749

M30. Radovi objavljeni u zbornicima međunarodnih skupova

M34, Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu

1. B Međo, M. Rakin, N. Gubelj, **W. Musraty**, A. Likeb, I. Cvijović-Alagić, A. Sedmak: *Fracture mechanics analysis of heterogeneous cylindrical structures using pipe-ring notched bend specimens*. 6th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Mountain Tara, Serbia, June 19-21 (2017)
2. **W. Musraty**, B. Međo, M. Rakin, N. Gubelj, Y. Matvienko, M. Arsić, A. Sedmak: *Prediction of pipe ring specimen failure conditions*. Proceedings of the 16th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F16), May 24-27, Dubrovnik (2016) pp. 293-294

1.3. Ocena podobnosti kandidata za rad na predloženoj temi

Na osnovu dosadašnjeg rada tokom poslediplomskih studija i pokazanih rezultata, Walid Mukhtar Musrati, master inženjer, je pokazao sklonost i sposobnost za bavljenje naučno-istraživačkim radom. Kao što je prethodno navedeno, kandidat je objavio 5 naučnih radova iz oblasti predložene teme disertacije (3 u časopisima i 2 na naučnim skupovima). Na osnovu dosadašnje saradnje sa kandidatom kao i objavljenih naučnih radova, Komisija smatra da kandidat ispunjava sve potrebne uslove za rad na predloženoj temi doktorske disertacije.

2. Obrazloženje teme

2.1. Predmet i cilj istraživanja

Cevovodi su najčešći vid transporta fluida, ali i čvrstih materijala u gotovo svim granama industrije. Bezbednost ovih konstrukcija je stoga od izuzetnog značaja i predmet je brojnih istraživanja. Jedan od prvih primera praktične primene mehanike loma na cevovodima, je analiza velikog broja prslina koja je metodama ispitivanja bez razaranja (IBR) nađena na gasovodu dugačkom više hiljada kilometara (između Aljaske i unutrašnjosti SAD). Primenom koncepta otvaranja vrha prsline (*Crack Tip Opening Displacement* - CTOD) je određen kriterijum prihvatljivosti veličine i položaja prsline, čime je obim reparaturnog zavarivanja značajno smanjen.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je razvoj metodologije, zasnovane prevashodno na mikromehaničkom pristupu, za karakterizaciju oštećenja i loma materijala cevovoda primenom epruveta oblika prstena. Ovaj pristup podrazumeva primenu eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih proračuna kojima se predviđa razvoj oštećenja u materijalu definisan parametrima

oštećenja. Kao poseban slučaj otkaza, analiziraće se i uslovi pod kojima dolazi do pojave plastičnog kolapsa.

Poznato je da 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 pogodnijih za određivanje otpornosti prema lomu cevovoda od standardnih. 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 veoma pogodna za ispitivanje loma cilindričnih struktura izloženih savijanju; 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, obično se karakterišu relativno kompleksnom pripremom i / ili procedurom testiranja.

U novije vreme, epruvete u obliku prstena 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 spoljnog 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.

Utvrđeno je slično polje napona i deformacija ispred koncentratora napona (žleb ili zamorna prslina) pri ispitivanjima savijanjem u tri tačke, kao i opis loma dobijen formiranjem krivih otpornosti (J -R krive), ali prevashodno na uzorcima koji su sečeni iz ploča (ne iz cevovoda), čime je bilo moguće postići idealnu geometriju u pogledu dimenzija i kružnosti epruveta. Dobijeni rezultati su, međutim vredni, jer preliminarno ukazuju na mogućnost primene nove geometrije za analizu otpornosti prema lomu pre svega ravnih deonica cevovoda.

Primena ovih uzoraka na cevi je urađena nedavno obimnom, pre svega eksperimentalnom analizom uticaja zaostalih napona na nastanak i razvoj loma EOP uzoraka. Analiza je rađena na čeličnim bešavnim cevima graničnog slučaja tankozidne strukture, gde je odnos spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika cevi blizak broju 1,2. Kao i u prethodnim analizama, geometrije uzoraka su imale strogo definisane odnose mera, što je debljina zida ispitivanih cevi omogućila. Takođe, uzimanje u obzir uticaj heterogenosti materijala, ovde nije bilo moguće, jer je ispitivanje ograničeno isključivo na bešavne cevi.

Ovom disertacijom je međutim predviđeno da se ispita 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 manje mase u poređenju sa gore navedenim strukturama, 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.

Koncentrator napona - žleb ili zamorna prslina - će biti urađeni u aksijalnom pravcu, što je kritični pravac za nastanak loma u cilindričnim strukturama izloženim unutrašnjem pritisku fluida.

Imajući u vidu da je karakter loma ovakvih cevi najčešće žilav - dakle praćen izraženom plastičnom deformacijom strukture, biće urađena analiza oštećenja materijala cevovoda ovim tipom loma koji se sastoji od nastanka šupljina u materijalu, njihovog rasta i finalne faze - spajanja šupljina, što dovodi do gubitka nosivosti i loma.

Osnovni cilj istraživanja je definisanje seta parametara u mikromehaničkom modelu koji će se koristiti za različite analizirane geometrije (postizanje prenosivosti parametara), što podrazumeva vrednosti za konstitutivne parametre modela, početni zapreminski udeo šupljina i kritični zapreminski udeo šupljina pri kome dolazi do njihovog spajanja i gubitka nosivosti materijala. Analiziraće se i eventualni uticaj sekundarnih šupljina nastalih oko čestica sekundarne faze, u ovom slučaju karbida železa.

Poseban cilj istraživanja je analiza uslova (spoljno opterećenje i dimenzije ispitivane geometrije oblika prstena) koji dovode do pojave plastičnog kolapsa, primenom geometrijske metode dvostrukog nagiba (*Twice Elastic Slope*), ali i numeričkih proračuna primenom metode konačnih elemenata - MKE, preko analize polja ekvivalentne plastične deformacije u ligamentu.

Poseban cilj istraživanja će biti i određivanje vrednosti korekcionog faktora za ispitivane geometrije oblika prstena η_{plast} koji se koristi za izračunavanje J integrala i to: a) preko zavisnosti promene spoljne sile od otvaranja usta prsline (CMOD) i b) preko zavisnosti vrednosti spoljne sile od pomeranja njene napadne tačke - mesta delovanja (*Load Line Displacement*). Očekuje se da se oblast važenja ovog faktora proširi za dužine početne prsline a/W van opsega uobičajeno razmatranih u literaturi i usvojenih u standardima (0.45 do 0.55).

Iz navedenih, opšteg i posebnih, ciljeva disertacije proističu i ključni očekivani rezultati, prvenstveno: i) razvoj kombinovanog eksperimentalno-numeričkog postupka zasnovanog na mikromehaničkoj analizi predviđanja razvoja oštećenja do loma materijala cevovoda na epruvetama koje su za to pogodne za primenu u inženjerskoj praksi (epruvete oblika prstena) ii) optimizacija razvijene metodologije u cilju njene primene u određivanju strukturnog integriteta cevovoda u različitim granama hemijske industrije i energetike, iii) određivanje uticaja heterogenosti materijala šavnih cevi (zavareni spojevi u uzdužnom pravcu), što će predstavljati osnovu za analizu heterogenosti obimno zavarenih cevovoda i prirubnih spojeva primenom razvijene metodologije i epruveta oblika prstena.

Bitne publikacije koje će biti korišćene pri izradi disertacije

- [1] T.L. Anderson: Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, third edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2005.
- [2] J. Besson et al.: Local Approach to Fracture, Presses de l'Ecole des Mines, 2004.
- [3] S. Saxena, N. Ramakrishnan, J.S. Chouhan: Establishing methodology to predict fracture behaviour of piping components by numerically predicting specimen fracture data using tensile specimen test. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 77, 2010, pp. 1058-1072.
- [4] Z.L. Zhang, C. Thaulow, J. Odegard: A complete Gurson model approach for ductile fracture. Eng Fract Mech, Vol. 67, 2000, pp. 155-168.
- [5] ABAQUS User code manuals: vers. 16.14.5.

- [6] M. Rakin: Lokalni pristup žilavom lomu metalnih materijala, Monografija, Savez inženjera metalurgije Srbije, Beograd, 2009.
- [7] M. Rakin, B. Medjo, N. Gubeljak, A. Sedmak: Micromechanical assessment of mismatch effects on fracture of high-strength low alloyed steel welded joints. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 109, 2013, pp. 221-235.
- [8] R. Chhibber, P. Biswas, N. Arora, S.R. Gupta, B.K. Dutta: Micromechanical modelling of weldments using GTN model. *International Journal of Fracture*, Vol. 167, 2011, pp. 71-82.
- [9] A. Likeb, N. Gubeljak, Y. Matvienko: Finite element estimation of the plastic npl factors for pipe-ring notched bend specimen using the load separation method. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 37, 2014, pp. 1319-1329.
- [10] B. Medjo, M. Rakin, N. Gubeljak, Y. Matvienko, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, A. Sedmak: Failure resistance of drilling rig casing pipes with an axial crack. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 58, 2015, pp. 429-440.
- [11] B. Younise, A. Sedmak, M. Rakin, N. Gubeljak, B. Medjo, M. Burzić, M. Zrilić: Micromechanical analysis of mechanical heterogeneity effect on the ductile tearing of weldments. *Materials & Design*, Vol. 37, 2012, pp. 193-201.
- [12] B. Medjo, M. Rakin, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, M. Zrilić, S. Putić: Determination of the load carrying capacity of damaged pipes using local approach to fracture. *Materials Transactions - JIM*, Vol. 53, 2012, pp. 185-190.
- [13] M. Rakin, N. Gubeljak, M. Dobrojević, A. Sedmak, Modelling of ductile fracture initiation in strength mismatched welded joint. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, 2008, pp. 3499-3510.
- [14] P.F Thomason P.F., Three-dimensional models for the plastic limit-loads at incipient failure of the intervoid matrix in ductile porous solids. *Acta Metallurgica*, Vol. 33, 1985, pp. 1079-1085.
- [15] A. Gurson: Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, 1977. pp. 2-15.
- [16] M. Bergant, A. Yawny, J. Perez Ipiña. Numerical study of the applicability of the g-factor method to J-resistance curve determination of steam generator tubes using non-standard specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 146, 2015, pp. 109-120.
- [17] G. Mahajan, S. Saxena, A. Mohanty. Numerical characterization of compact pipe specimen for stretch zone width assessment. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 39, 2016, pp. 859-865.
- [18] J. Xu, Z.L. Zhang, E. Østby, B. Nyhus, D.B. Sun: Constraint effect on the ductile crack growth resistance of circumferentially cracked pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, 2010, pp. 671-84.

2.2. Polazne hipoteze

Polazne hipoteze koje se mogu izdvojiti kao osnova za započinjanje naučno-istraživačkog rada u okviru ove disertacije su sledeće:

- 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).
- Nestandardne epruvete predložene u prethodnom periodu su ili namenjene ispitivanju uticaja koncentratora napona u obimnom pravcu, ili su karakterisane složenim postupkom ispitivanja/izrade.
- Mikromehanička analiza je u prethodnom periodu korišćena u razmatranju razvoja oštećenja do loma homogenih i (makroskopski) heterogenih struktura od metalnih materijala, zbog čega će u ovoj disertaciji biti primenjena u predviđanju otpornosti prema oštećenju cilindričnih struktura.
- Kompleksna trodimenzionalna geometrija predstavlja problem pri formiranju početne prsline, pa se očekuje da će kroz istraživanja biti potvrđeno da žleb kao koncentrator napona može dati merodavne rezultate.
- Definisanje spregnutog eksperimentalno-numeričkog postupka predviđanja otkaza će u punoj meri uključiti numeričku analizu kao alat za određivanje veličina koje nije moguće odrediti na drugi način.
- Očekuje se da rezultatima istraživanja bude 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 se očekuju pouzdani i ponovljivi rezultati u širokom opsegu dimenzija strukture i koncentratora napona.

2.3. Metode istraživanja

Metode koje se uobičajeno koriste u ispitivanjima mehanike loma nemaju mogućnost kvantitativnog uzimanja u obzir razvoja oštećenja materijala mehanizmom žilavog loma. Stoga će se u disertaciji primeniti mikromehanička analiza. Pojednostavljeno rečeno, ovakva analiza obuhvata niz eksperimentalnih i numeričkih metoda (pre svega zasnovanih na proračunima MKE) koje imaju za cilj kvantitativni opis sve tri faze žilavog loma. Pri tome, eksperimentalna analiza obuhvata ne samo mehaničku karakterizaciju materijala i ispitivanja mehanike loma, već i kvantitativnu mikrostrukturnu analizu. Imajući u vidu da se vrednosti ključnih promenljivih (deformacija, napon, parametri oštećenja) razmatraju na lokalnom nivou, metodologija koja će biti primenjena se može svrstati u oblast lokalnog pristupa lomu.

Predviđena analiza EOP uzoraka sečenih iz ploče ima za cilj verifikaciju 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 . Iz ovog sledi da će se prevashodno primeniti takozvani spregnuti mikromehanički pristup, gde je promenljiva f deo konstitutivnog modela plastičnog tečenja materijala. Modeli koji će biti primenjeni su zasnovani na Gursonovom kriterijumu tečenja kao pogodnom za analizu žilavog loma čelika. Kvalitet modela zasnovanih na ovom kriterijumu je da se zapreminski udeo šupljina računa tokom proračuna MKE, jer je ova promenljiva upravo sadržana u konstitutivnom modelu plastičnog tečenja materijala. Po potrebi,

biće primenjeni i nespregnuti mikromehanički pristup nastanka i razvoja oštećenja, gde se koristi klasični fon Mizesov kriterijum plastičnog tečenja, a odnos rasta šupljina prema modelu Rajsa i Trejsija se određuje postprocesorskim proračunom.

Mikromehaničkom analizom će biti razmatran i uticaj heterogenosti materijala kod EOP uzoraka isečenih iz šavnih cevi na otpornost prema lomu. Odrediće se razlika u ponašanju pri lomu osnovnog metala i metala šava, kao i uticaj ometenog razvoja deformacije (*constraint effect*) na otkaz i lom. Heterogenost materijala će se uzeti u obzir preko mehaničkih i mikrostrukturnih osobina zona zavarenog spoja šavne cevi: krive stvarni napon - stvarna deformacija i zapreminskog udela nemetalnih uključaka.

Metodologija istraživanja u okviru disertacije će obuhvatiti eksperimentalna ispitivanja epruveta u obliku prstena i to: sečenih iz punog materijala - čelika povišene čvrstoće i epruveta sečenih iz tankozidnih šavnih i bešavnih cevi od čelika za izradu cevovoda pod pritiskom za primenu do maksimalno 300 °C. 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.

Na setu isečenih epruveta biće urađeni koncentratori napona - inicijalna oštećenja (na svakom uzorku po dva - simetrično postavljena na kružnom prstenu): a) žlebovi i b) zamorne prsline. Pripremljeni uzorci će biti savijani u tri tačke na univerzalnoj hidrauličnoj kraljici na kojoj će simultano biti mereno otvaranje usta prsline (*Crack Mouth Opening Displacement* CMOD) i otvaranje vrha prsline (CTOD - preko δ_5 koncepta): i) korišćenjem COD (*Crack Opening Displacement*) davača na jednom od dva koncentratora napona na epruveti i ii) primenom beskontaktnih stereometrijskih merenja sa dve sinhronizovane kamere i odgovarajućeg softverskog rešenja za obradu podataka AramisTM proizvođača GOM.

Na polomljenim uzorcima će biti urađena fraktografska analiza na snimcima visoke rezolucije i određen rast prsline na osnovu analize prelomne površine, pre svega 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 prethodno navedenih krivih otpornosti prema lomu.

Da bi se primenila mikromehanička analiza, na metalografski pripremljenim uzorcima biće urađena kvantitativna mikrostrukturna analiza radi određivanja sadržaja (udela) nemetalnih uključaka u čeliku i srednjeg slobodnog puta između njih.

S obzirom na činjenicu da mikromehanička analiza podrazumeva kombinovani eksperimentalno-numerički postupak, proračuni će biti urađeni primenom metode konačnih elemenata (MKE) - trodimenzionalna analiza.

Očekuje se da mehanizam loma, pogotovo kod izuzetno tankozidnih šavnih i bešavnih cevi, bude žilav, što znači da ga je moguće analizirati mikromehaničkim modelima za taj mehanizam loma. Za kriterijume početka rasta inicijalnog oštećenja i otkaza nosivosti materijala cevovoda (loma) biće primenjen kompletni Gursonov model (complete Gurson model, CGM) i po potrebi drugi mikromehanički modeli zasnovani na Gursonovom kriterijumu plastičnog tečenja materijala.

Cilj navedenih metoda istraživanja 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.

Stvarne krive napon-deformacija će biti određene na standardnim glatkim epruvetama kružnog poprečnog preseka. Po potrebi, biće pripremljene i MTS epruvete (*Micro Tensile Specimens*), pravougaonog poprečnog preseka u cilju određivanja zateznih karakteristika u zoni zavarenog spoja kod šavnih cevi. Uticaj heterogenosti materijala u toj zoni će preliminarno biti određen na osnovu rezultata merenja mikrotvrdoće.

Inicijalno oštećenje (žleb ili zamorna prslina) će biti urađeni u aksijalnom pravcu, kao kritičnom kod cilindričnih struktura za razvoj oštećenja do loma. Variraće se dužina inicijalnog oštećenja (a/W), ali i ostale geometrijske mere epruveta: prečnik D , širina W i debljina B .

Osim epruveta oblika prstena, mikromehanička analiza će biti urađena i na CT epruvetama manjih dimenzija (*sub-sized*) koje je moguće pripremiti iz tankozidnih struktura cevi. Odrediće se uticaj veličine inicijalnog oštećenja oblika prsline (a/W) na krive otpornosti prema lomu i uporediti sa dobijenim vrednostima na epruvetama oblika prstena.

Na osnovu eksperimentalne analize, obrade eksperimentalnih rezultata i u sprezi sa numeričkom analizom, formiraće se krive: sila - otvaranje usta/vrha prsline (F -CMOD/CTOD), krive otpornosti prema rastu prsline (CTOD- Δa), zavisnost ekvivalentnog napona, plastične deformacije i troosnosti napona od udaljenosti od vrha koncentratora napona, kao i razvoj/rast zapreminskog udela šupljina u ligamentu ispred vrha prsline primenom mikromehaničkog modela. Krive otpornosti prema rastu prsline će biti formirane za sve geometrije koje će biti eksperimentalno i mikromehanički analizirane (pre svega preko zavisnosti otvaranja vrha prsline CTOD od njenog rasta), a na delu uzoraka (zbog obima rada) će biti ispitani uslovi pri kojima dolazi do početka rasta inicijalnog oštećenja. Pojava plastičnog kolapsa razmatraće se preko dijagrama zavisnosti graničnih opterećenja od karakterističnih dimenzija epruvete.

2.4. Očekivani naučni doprinos

Opšti rezultat ovih istraživanja treba da bude sveobuhvatno razumevanje ponašanja epruveta oblika prstena u uslovima otkaza mehanizmom žilavog loma i plastičnog kolapsa i pouzdana procena integriteta cilindričnih struktura na osnovu dobijenih rezultata. Istraživanja u okviru disertacije će dati sledeće naučne doprinose:

- Verifikacija primenljivosti nove epruvete oblika prstena na šavnim i bešavnim tankozidnim cevima različitih dimenzija i sa različitim oblikom i veličinom inicijalnog oštećenja.
- Određivanje uticaja geometrije epruvete i koncentratora napona, kao i heterogenosti materijala na otpornost prema lomu i plastičnom kolapsu.
- Analiza prenosivosti mikromehaničkih parametara - početnog zapreminskog udela šupljina i dimenzija konačnih elemenata u ligamentu, za serije epruveta oblika prstena i dovodenje u vezu ovih parametara sa ponašanjem materijala u uslovima razvoja oštećenja do loma.
- 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).

- Određivanje vrednosti parametara LEML/EPML (linearno-elastične i elasto-plastične mehanike loma) i opterećenja plastičnog kolapsa za širok spektar geometrija epruveta, kod kojih se odnos širine epruvete i debljine zida, kao i odnos dužine koncentratora napona i širine epruvete, nalaze van opsega najčešće korišćenih u ispitivanjima mehanike loma.
- Definisanje celovite procedure za izradu, ispitivanje i numeričku analizu otkaza epruveta oblika prstena izloženih spoljašnjem opterećenju - savijanju.

2.5. Plan istraživanja i struktura rada

Plan istraživanja podrazumeva primenu metodologije prikazane u prethodnom tekstu i u načelu se može podeliti na: i) analizu rezultata iz literature, ii) rad na eksperimentalnim ispitivanjima, uključujući pripremu uzoraka, iii) rad na formiranju numeričkih modela i proračunima metodom konačnih elemenata uz primenu mikromehaničkih modela oštećenja i iv) obradu, analizu i diskusiju rezultata.

Struktura rada je predviđena kroz sledeća poglavlja: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo (Materijali i metode), Rezultati i diskusija, Zaključak i Literatura.

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

U Teorijskom delu disertacije biće date osnove linearno-elastične mehanike loma (LEML) i detaljniji prikaz metoda i parametara elasto-plastične mehanike loma (EPML). Razvoj oštećenja do loma praćenog plastičnim deformisanjem će biti opisan kroz sve tri faze nastanka žilavog loma: nastanak, rast i spajanje šupljina - kako u materijalu bez inicijalnih prslina, tako i u materijalu sa inicijalnim prslinama. Analiziraće se polje napona i deformacije ispred vrha prsline, posebno uticaj troosnosti naponskog stanja. Daće se prikaz najčešće korišćenih geometrijskih parametara EPML: otvaranja usta prsline (CMOD) i otvaranja vrha prsline (CTOD); posebno će se obraditi δ_5 koncept za eksperimentalno i numeričko određivanje CTOD, jer će biti primenjen u istraživanjima u okviru disertacije. Energetski aspekt loma će se razmatrati preko gustine energije deformacije i J-integrala, gde će biti i razmatrana primena ovog parametra EPML u analizi početka rasta i stabilnog rasta prsline u materijalu.

S obzirom na planiranu primenu različitih kriterijuma plastičnog tečenja i otkaza nosivosti materijala mikromehaničkim modelima prevashodno za mehanizam žilavog loma (baziranih na Gursonovom i modifikovanom Gursonovim kriterijumu), daće se osnovni izrazi za sferni i devijatorski deo tenzora napona i prateći izrazi za komponente deformacije.

Cilj disertacije je sveobuhvatna analiza integriteta materijala cevovoda, te će se osim razmatranja oštećenja i loma materijala cevovoda primenom parametara EPML i mikromehaničkih modela, diskutovati i uslovi koji mogu dovesti do pojave plastičnog kolapsa strukture.

Razmotriće se pojava i vrste oštećenja koje nastaju u materijalu cevovoda tokom proizvodnje, montaže i eksploatacije, kao mesta nastanka makroskopskog oštećenja. Biće dat kratak prikaz i diskusija istraživanja iz literature kojima su predložene nestandardne epruvete za ispitivanje otpornosti prema lomu cevovoda. Razmotriće se njihove prednosti i loše strane, sa stanovišta izrade, postupka ispitivanja i rezultata ispitivanja.

U Eksperimentalnom delu biće navedeni svi materijali i metode korišćene u disertaciji:

- Materijali ispitivani u radu;
- Postupak beskontaktnog stereometrijskog merenja pomeranja strukture izložene spoljnom opterećenju pomoću dve sinhronizovane kamere visoke rezolucije i licenciranog softverskog paketa Gom Aramis;
- Metode korišćene za određivanje zateznih svojstava materijala i postupak formiranja krivih stvarni napon - stvarna deformacija;
- Metoda za određivanje tvrdoće materijala šavnih i bešavnih cevi;
- Postupak određivanja širine zavarenog spoja šavnih cevi analizom mikrofotografija strukture zavarenog spoja u nagriženom stanju;
- Postupak kvantitativne mikrostrukturne analize ispitivanih materijala;
- Metode za eksperimentalno ispitivanje oštećenja do loma EOP i CT epruveta;
- Postupak određivanja oblika i dužine fronta prsline posle loma EOP i CT epruveta;
- Metoda za eksperimentalnu analizu plastičnog kolapsa EOP epruveta;
- Metode dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih numeričkih proračuna MKE (EOP i CT geometrija epruveta), uz primenu mikromehaničkih modela zasnovanih na Gursonovom kriterijumu plastičnog tečenja, oštećenja i loma materijala, primenom licenciranog softverskog paketa Abaqus;
- Postupak numeričkog određivanja uslova koji dovode do plastičnog kolapsa materijala cevovoda na EOP epruvetama, primenom MKE i istog softverskog paketa.

U poglavlju Rezultati i diskusija biće naveden detaljan prikaz svih rezultata dobijenih u okviru rada na disertaciji i data njihova analiza, sa posebnim osvrtom na primenljivost rezultata u određivanju integriteta novih cevovoda i cevovoda iz eksploatacije.

U poglavlju Zaključak će biti sumirani dobijeni rezultati i dati zaključci izvedeni na osnovu izvršenih ispitivanja.

U poglavlju Literatura biće dat pregled svih referenci citiranih u disertaciji, uključujući publikovane radove proistekle iz istraživanja u okviru ove doktorske disertacije.

3. Zaključak i predlog Komisije

Na osnovu iznetih podataka o dosadašnjem radu i postignutim rezultatima, Komisija smatra da kandidat **Walid Mukhtar Musrati**, master inženjer, ispunjava sve potrebne uslove za rad na predloženoj temi doktorske disertacije koja pripada naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo, užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala, za koju je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu matična ustanova. Komisija takođe smatra da je predložena tema doktorske disertacije „**Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena**” / “**Characterisation of damage and fracture of pipeline material using ring-shaped specimens**“, naučno zasnovana i predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da je prihvati i odobri izradu ove disertacije. Za mentora se predlaže dr Marko Rakin, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Doktorska disertacija će biti napisana i odbranjena na engleskom jeziku.

Beograd, 9. 2. 2018.

KOMISIJA:

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”