

Факултет ТЕХНОЛОШКО-
МЕТАЛУРШКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/61

Веће научних области техничких наука

(Број захтева)

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

03.04.2023.

(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације
и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете
облика прстена изложене затезању

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ ТЕХНОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

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

Исаак (Драган) Трајковић

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Универзитет у Београду,

Технолошко-металуршки факултет, Мастер студије, Мастер инжењер технологије

3. Година завршетка
претходног нивоа студија: 2019.

4. Година уписа на докторске студије: 2019.

5. Назив студијског програма
докторских студија:

Инжењерство материјала

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ :

Име и презиме ментора: др Бојан Међо

Звање: ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. W. Musrati, B. Međo, N. Gubeljak, P. Štefane, D. Veljić, A. Sedmak, M. Rakin. *Fracture assessment of seam and seamless steel pipes by application of the ring-shaped bending specimens*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 103 (2019) paper No. 102302, ISSN 0167-8442, IF 2019: 3.021, Engineering, Mechanical (2019: 33/130), Mechanics (2019: 33/136)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102302>
2. A. Sedmak, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, B. Međo, M. Rakin, D. Arsić, V. Lazić, *Remaining strength of API J55 steel casing pipes damaged by corrosion*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 188. (2020) paper No. 104230, ISSN 0308-0161, IF 2020: 2.028, Engineering, Mechanical (2020: 74/133), Engineering, Multidisciplinary (2020: 50/91)
<https://doi.org/10.1016/j.ijvp.2020.104230>
3. W. Musrati, 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 2017: 2.580, Mechanics (2017: 28/134)
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.01.022>
4. B. Younise, M. Rakin, N. Gubeljak, B. Međo, A. Sedmak, *Effect of material heterogeneity and constraint conditions on ductile fracture resistance of welded joint zones – Micromechanical assessment*, Engineering Failure Analysis, vol. 82, pp. 435-445 (2017) ISSN 1350-6307, IF 2017=2.157, Engineering, Mechanical (2017: 46/128), Materials Science, Characterization & Testing (2017: 11/33)
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.006>
5. B. Međo, 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. 58/2, pp. 429-440 (2015) ISSN 1350-6307, IF 2015 = 1.358, Engineering, Mechanical (2015: 49/132), Materials Science, Characterization & Testing (2015: 11/33)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.015>

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

- Прилог
1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
 2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

ДШ

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 43. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 09.03.2023. 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 **Исаака Трајковића**, број индекса 4016/19, под називом: **„Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању“**.

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

За ментора се одређује др Бојан Међо, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет.

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

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **Исаака Д. Трајковића**, мастер инж. техн., за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду бр. 35/15 од 2.2. 2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Исаака Д. Трајковића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **“Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању”**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Кандидат Исаак Трајковић је рођен 03.01.1996. године у Београду, Република Србија. Након завршене основне школе у Владимировцу и Хемијско-медицинске школе у Вршцу, уписује Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду, школске 2014/15. године. Основне академске студије одсек биохемијско инжењерство и биотехнологија, завршава 2018. године са просечном оценом 8,08. Мастер академске студије, смер биохемијско инжењерство, завршава 2019. године са просечном оценом 8,63.

Након завршетка мастер академских студија уписује докторске академске студије 2019. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Од децембра исте године је запослен у Иновационом центру Машинског факултета у Београду.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је уписао докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету школске 2019/20. на студијском програму Инжењерство материјала. Положио је све испите предвиђене програмом, са просечном оценом 8,82 и одбранио завршни испит на тему „Експериментално и нумеричко одређивање параметара механике лома на моделима епрувета типа PRNT (*Pipe Ring Notched Tension*)“.

Положени испити и остварени бодови у току докторских студија	ЕСПБ	Оцена
1. Одабрана поглавља нумеричке анализе	5	6
2. Метода коначних елемената у инжењерству материјала	4	10
3. Физичка хемија полимера	5	8
4. Колоидна хемија	5	8
5. Хемијска кинетика	5	8
6. Хемија хетероцикличних једињења	5	10
7. Електрохемијски и алтернативни извори електричне енергије	5	10
8. Наука о материјалима и инжењерство материјала	6	9
9. Термодинамика чврстог стања	5	10
10. Инжењерство хелије	5	10
11. Енглески језик		10
12. Завршни испит	30	10
Укупно ЕСПБ	80	
Просечна оцена		8,82

Кандидат је укључен у реализацију међународног пројекта под називом „Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through additive Manufacturing“, (H2020-WIDESPREAD-2018-03, No. 857124). Од 2022. године кандидат активно учествује и у реализацији пројекта Европске Мреже Предузетништва.

Током досадашњег научно-истраживачког рада, кандидат је стекао искуство у раду на универзалној машини за испитивање материјала, опреми за оптичка мерења, као и на 3Д штампачима. Такође, стекао је драгоцену искуства у раду са разним софтверским алатима и програмским језицима, као што су “GOM Aramis”, “GOM Correlate”, “GOM Inspect”, “Simulia Abaqus”, “SolidWorks”, “AutoCad”, “Simplify3D”, “PreForm”, “HTML”, “CSS”, “JavaScript”, “WordPress”.

Кандидат је члан Друштва за интегритет и век конструкција, Српског керамичког друштва и члан организационих одбора међународних конференција “CNNTech - International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies”, “ACA - Advanced Ceramics and Application” и “IRASS - International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components”.

Из резултата досадашњег научно-истраживачког рада кандидата на предложеној теми дисертације произашао је 1 (један) рад објављен у истакнутом међународном часопису, 1 (једно) саопштење са научног скупа међународног значаја у целини и 4 (четири) саопштења са научних скупова међународног значаја објављена у изводу.

Објављени научни радови и саопштења која показују афинитет, способност и подобност кандидата за израду дисертације

Радови објављени у часописима међународног значаја

M21, Рад у врхунском међународном часопису

- Milovanović, A., Sedmak, A., Golubović, Z., Zelić Mihajlović, K., Žurkić, A., Trajković, I., Milošević, M., *The Effect of Time on Mechanical Properties of Biocompatible Photopolymer Resins Used for Fabrication of Clear Dental Aligners*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 119, No.104494, pp. 1-9, 2021, IF 2021: 4.042, ISSN: 1751-6161, DOI:10.1016/j.jmbbm.2021.104494.

M22, Рад у истакнутом међународном часопису

- Nikitović, A., Pešić D., Kolak V., Lalović M., Milošević M., Trajković I., Melih I., *3D Digital Image Correlation Analysis of Local Deformation Field of Different Endodontic*

Calcium Silicate Cements, Applied Sciences, Vol. 13, No. 3, 2023, 1633. IF 2021: 2.838, DOI: 10.3390/app13031633, EISSN 2076-3417, DOI: 10.3390/app13031633.

- Travica, M., Mitrović, N., Petrović, A., Trajković, I., Milošević, M., Sedmak, A., Berto, F., *Experimental Evaluation of Hoop Stress-Strain State of 3D-Printed Pipe Ring Tensile Specimens*, Metals, Vol. 12, No. 10, 121560, 2022. IF 2021: 2.695, EISSN 2075-4701, DOI: 10.3390/met12101560.
- Trajković, I., Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Mladenović, G., Kudrjavceva, Lj., Medjo, B., *Novel Method for Measurement of Pipeline Materials Fracture Resistance-Examination on Selective Laser Sintered Cylindrical Specimens*, Science of Sintering, Vol. 54, No. 3, pp: 373-386, 2022, IF 2021: 1.725, ISSN: 0350-820X, DOI: 10.2298/SOS2203373T.
- Popović, M., Veličković, Z., Bogdanov, J., Marinković, A., Casas Luna, M., Trajković, I., Obradović, N., Pavlović, V., *Removal of the As (V) and Cr (VI) from the Water Using Magnetite/3D-Printed Wollastonite Hybrid Adsorbent*, Science of Sintering, Vol. 54, No. 1, pp. 105 - 124, 2022, IF 2021: 1.725, ISSN: 0350-820X, DOI: 10.2298/SOS2201105P.
- Mihailović, V., Mirić-Milosavljević, M., Djurković, M., Mladenović, G., Milošević, M., Trajković, I., *Loading Rate Effects on MOE and MOR Distributions in Testing of Small Clear Beech Wood Specimens*, BioResources Jurnal, Vol. 17, No. 1, pp. 1818 - 1835, 2022, IF 2021: 1.747, ISSN: 1930-2126, DOI: 10.15376/biores.17.1.1818-1835.

M23, Рад у међународном часопису

- Vorkapić, M., Mladenović, I., Ivanov, T., Kovačević, A., Sakib Hasan, M., Simonović, A., Trajković, I., *Enhancing Mechanical Properties of 3D Printed Thermoplastic Polymers by Annealing in Moulds*, Advances in Mechanical Engineering, SAGE Publishing, Vol. 14, No. 8, 2022, IF 2021: 1.566, , ISSN: 1687-8132, DOI: 10.1177/16878132221120737.
- Milošević, M., Trajković, I., Golubović, Z., Ivanov, T., Mladenović, G., Milovanović, A., Mitrović, N., *Development of Methodologies for Experimental Analysis of Neck Deformations Caused by Impact Forces in Matrial Arts*, Advances in Mechanical Engineering, SAGE Publishing, Vol. 14, No. 8, 2022, IF 2021: 1.566, ISSN: 1687-8132, DOI: 10.1177/16878132221121515.
- Golubović, Z., Travica, M., Trajković, I., Petrović, A., Mišković, Z., Mitrović, N., *Investigation of Thermal and Dimensional Behavior of 3-D Printed Materials Using Thermal Imaging and 3-D Scanning*, Thermal Science, vol. 27, pp. 21-31, 2023, IF 2021: 1,971, ISSN: 0928-4931 DOI: 10.2298/TSCI2301021G.

Радови објављени у зборницима међународних скупова

M33, Саопштење са међународног скупа у целини

- Trajković, I., Milošević, M., Rakin, M., Sedmak, A., Medjo, B., *Additively Manufactured Tensile Ring-Shaped Specimens for Pipeline Material Fracture Examination - Influence of Geometry*, Procedia Structural Integrity, Vol. 42, pp. 1314-1319, 2022, ISSN: 2452-3216, DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.167.

M34, Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

- Trajković, I., Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Jevtić, I., Sedmak, A., Medjo, B., *Laser Sintered Polyamide Specimens - Fabrication and Tensile Testing Conditions on Different Geometries*, The Tenth Serbian Ceramic Society Conference, Advanced Ceramics and Application, Serbian Academy of Sciences and Arts, pp. 80, 2022, ISBN 978-86-915627-9-3.

- Trajković, I., Milošević, M., Međo, B., Ćirić-Kostić, S., *Development of Ring-Shaped Specimen Design Using Selective Laser Sintering Fabrication Technique*, Serbian Ceramic Society Conference - Advanced Ceramics and Application IX, Belgrade, pp. 60, 2021, ISBN 978-86-915627-8-6.
- Trajković, I., Medjo, B., Rakin, M., Milošević, M., Sedmak, A., *In Situ Full-field Strain Measurement of Pipeline Samples Obtained Using Additive Manufacturing Process*, ICSID 2021, 5th International Conference on Structural Integrity and Durability, pp. 60., 2021, ISSN 2584-3907.
- Trajković, I., Milovanović, A., Jevtić, I., Travica, M., Marsavina, L., Medjo, B., Nahlik, L.: *Monitoring of Fracture Mechanics Parameters on Single Endge Notched Tension Specimens Made of PLA Material*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, Zlatibor, Serbia, 2021, ISBN: 978-86-6060-120-1.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег рада и остварених резултата, кандидат Исаак Д. Трајковић је показао изузетно интересовање и способност за бављење научноистраживачким радом, кроз истраживања везана за докторску дисертацију и кроз рад на осталим активностима. До сада је објавио 14 научних радова: 9 радова у часописима и 5 саопштења на научним скуповима. На основу свега наведеног, као и на основу сарадње са њим, Комисија сматра да кандидат испуњава све потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања

Испитивање и анализа особина материјала цевовода представља основу за обезбеђење сигурног рада и интегритета цевовода у индустрији. Унапређење технологије производње, увођење нових и унапређење постојећих материјала захтевају адекватне лабораторијске методе и технике за одређивање механичких особина, укључујући отпорност према развоју оштећења и лома у материјалу. При пројектовању и експлоатацији цевовода, треба узети у обзир могућа иницијална оштећења, до којих може доћи током производње и термомеханичке обраде цеви, као и током монтаже цевовода. Примери критичних места су заварени спојеви на цевима, јер представљају места појаве микропрелина и других нехомогености, од којих могу настати макроскопска оштећења под дејством оптерећења.

Постојећи стандардни узорци (епрувете) и процедуре за одређивање отпорности према лому конструкционих материјала [1,2] имају одређена ограничења када је у питању испитивање узорака цевовода. Главно ограничење када су у питању испитивања узорака стандардним процедурама јесте дебелина узорака која не може бити задовољена у већини случајева када се ради о танкозидним цевима, већински коришћеним у готово свим гранама индустрије. Друга неповољна ситуација када се ради о одређивању параметара механике лома стандардним процедурама је припрема епрувета која се врши исецањем из цеви, уз накнадно деформисање да би се добила равна геометрија. На овај начин уносе се заостали напони и мења се понашање материјала при дејству оптерећења.

У литератури се може пронаћи више предлога нестандардних геометрија епрувета за испитивање отпорности према лому [3-7], као и за одређивање затезних особина материјала цевовода [8-11]. Истраживања спроведена у претходној деценији од стране више истраживачких група широм света, илуструју потребу да се дође до геометрије епрувете која би дала резултате који се могу адекватно применити на цевоводе, нарочито танкозидне. Предложене геометрије нестандардних епрувета могу се поделити на две групе: епрувете са

обимним положајем концентратора напона и епрувете са уздужним положајем концентратора напона. Прва група је важна за испитивање особина цеви које су изложене оптерећењима у уздужном правцу. Код друге групе нагласак је на одређивању отпорности према отказу изазваном дејством обимног напона, који је критичан код цилиндричних структура изложених унутрашњем притиску флуида. Нажалост, велики број нестандартних геометрија подразумева сложен поступак израде епрувете и/или припреме за испитивање, што ограничава њихову применљивост. Међу епруветама за испитивање отпорности према лому материјала цевовода, највећи напредак је до сада остварен код епрувете за затезање са ивичним концентратором напона (SENT - Single Edge Notch Tension, [12,13]), за коју су развијене националне стандардне процедуре у неколико држава. Ова епрувета намењена је испитивању утицаја оштећења у обимном правцу, тј. симулира понашање материјала цеви изложене доминантном оптерећењу у правцу осе. У претходном периоду, уведене су и детаљно анализирани епрувете облика прстена са концентратором напона у уздужном правцу за испитивање савијањем (PRNB - Pipe Ring Notch Bending), [14-17], при чему је геометрија епрувете и испитивања заснована на испитивању стандардних епрувета за савијање у три тачке.

У овој дисертацији, примениће се други приступ: развој епрувете која има облик прстена са концентратором напона у уздужном правцу, али се оптерећење уводи затезањем, преко контакта са цилиндричним алатима чији полупречник је једнак унутрашњем пречнику прстена. Овај начин увођења оптерећења представља покушај да се у лабораторијским условима што реалније представи оптерећење које се јавља у експлоатацији - контакт између алата и унутрашње површине прстена симулира унутрашњи притисак флуида у цеви.

Да би се могла увести и верификовати нова геометрија епрувете (PRNT - Pipe Ring Notch Tensile) за одређивање отпорности према лому материјала цевовода, неопходно је успоставити и оптимизовати процедуру испитивања и развити поступак за обраду резултата који ће се користити за одређивање вредности параметара механике лома и других потребних величина. Дефинисање геометрије епрувета и поступка за одређивање параметара механике лома биће спроведени кроз експериментална, аналитичка и нумеричка истраживања, а методологија ће бити описана у наставку. У нумеричкој анализи користиће се софтверски пакет Simulia Abaqus [18], док ће при експерименталном испитивању свих епрувета бити коришћена метода корелације дигиталних слика (DIC - Digital Image Correlation) [19,20]. Поступак испитивања ће бити развијен коришћењем прототипова епрувета израђених од полимерних материјала методама адитивне производње [21-24], а потом примењен на епрувете израђене од челичних цеви.

Циљ истраживања

Циљ истраживања је развој нове нестандартне епрувете облика прстена са оштрим концентратором напона у уздужном правцу, што укључује развој процедуре испитивања, методологије одређивања параметара механике лома и обраде резултата испитивања, чијом применом ће се превазићи проблеми који се јављају при примени постојећих поступака испитивања отпорности према лому на материјале танкозидних цевовода.

Резултати ће обухватити одређивање утицаја више фактора на отпорност према лому, пре свих броја концентратора напона (један или два) и њихове дужине, као и начина оптерећења (затезање и савијање). Верификоваће се применљивост епрувета облика прстена са једним концентратором напона, које се могу испитати затезањем, али не и савијањем. Утицај наведених фактора ће се квантитативно одредити преко поља деформације, вредности параметара механике лома, кривих зависности оптерећења од CMOD и CTOD и кривих отпорности према расту прслине.

Библиографија:

- [1] T.L. Anderson: Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, third edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2005.
- [2] M. Rakin, Lokalni pristup žilavom lomu metalnih materijala, Monografija, Savez inženjera metalurgije Srbije, Beograd, 2009.
- [3] 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, 2016, vol. 39, pp. 859-865.
- [4] M. Bergant, A. Yawny, J. Perez Ipiña, Experimental determination of J-resistance curves of nuclear steam generator tubes, Engineering Fracture Mechanics, 2016, vol.164, pp. 1-18.
- [5] J.M. Koo, S. Park, C.S. Seok, Evaluation of fracture toughness of nuclear piping using real pipe and tensile compact pipe specimens, Nuclear Engineering and Design, 2013, vol. 77, pp. 198-204.
- [6] L. Gajdos, M. Sperl, Evaluating the integrity of pressure pipelines by fracture mechanics, Applied Fracture Mechanics, InTech Publishing, 2012, vol. 10, pp. 283-310.
- [7] W. Liu, B. Wang, X. Li, H. Sun, R. Nan, Y. Qi, Research on fracture toughness and strength of thin-walled Ti-B25 pipes using small notched beams, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, vol. 199, No. 104685.
- [8] I. Barsoum, K.F. Al Ali, A procedure to determine the tangential true stress-strain behavior of pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2015, vol. 128 pp. 59-68.
- [9] M. Kiraly, D. M. Antok, L. Horvath, Z. Hozer, Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes, Journal Nuclear Engineering and Technology, 2018, vol. 50, pp. 425-431.
- [10] Z. Ktari, C. Leitão, P. A. Prates, A. Khalfallah, Mechanical design of ring tensile specimen via surrogate modelling for inverse material parameter identification, Mechanics of Materials, 2021, vol. 153, No. 103673.
- [11] M. Travica, N. Mitrović, G. Mladenović, A. Milovanović, N. Milošević, M. Milošević, A. Petrović, "Tool for testing ring-shaped specimens," National patent No. 1629, 2019.
- [12] Z. Liu, X. Wang, S. Shi, Y. Shen, X. Chen, Application of modified normalization method for J-R curve determination using clamped SENT specimens with varying in-plane and out-of-plane constraints, Engineering Fracture Mechanics, 2020, vol. 230, No. 106968.
- [13] Ameli, B. Asgarian, M. Lin, S. Agbo, R. Cheng, D. Duan, S. Adeeb, Estimation of the CTOD-crack growth curves in SENT specimens using the eXtended finite element method, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, vol. 169, pp. 16-25.
- [14] W. Musrati, B. Međo, N. Gubeljak, P. Štefane, D. Veljić, A. Sedmak, M. Rakin. Fracture assessment of seam and seamless steel pipes by application of the ring-shaped bending specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, vol.103, No. 102302.
- [15] W. Musrati, 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, 2017, vol. 175, pp. 247-261.
- [16] Likeb, N. Gubeljak, Y. Matvienko, Finite element estimation of the plastic η_{pl} factors for pipe-ring notched bend specimen using the load separation method, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2014, vol. 37, 12, pp. 1319-1329.

- [17] D. Damjanović, D. Kozak, N. Gubeljak, The influence of residual stresses on fracture behavior of Pipe Ring Notched Bend specimen (PRNB), *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 205, pp. 347-358.
- [18] ABAQUS User manuals: vers. 2018.
- [19] Jandjsek, L. Gajdoš, M. Šperl, D. Vavřík, Analysis of standard fracture toughness test based on digital image correlation data, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 182, pp. 607-620.
- [20] Tanasić, D. Šarac, N. Mitrović, L. Tihaček-Šojić, Ž. Mišković, A. Milić-Lemić, M. Milošević, Digital Image Correlation Analysis of Vertically Loaded Cylindrical Ti- Implants With Straight and Angled Abutments. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40, pp. 1227-1233.
- [21] A.J. Cano, A. Salazar, J. Rodríguez, Effect of temperature on the fracture behavior of polyamide 12 and glass-filled polyamide 12 processed by selective laser sintering, *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, vol. 203 pp. 66-80.
- [22] T. Brugo, R. Palazzetti, S. Ciric-Kostic, X. T. Yan, G. Minak, A. Zucchelli, Fracture mechanics of laser sintered cracked polyamide for a new method to induce cracks by additive manufacturing, *Polymer Testing*, 2016, vol. 50, pp. 301-308.
- [23] S. Rosso, R. Meneghello, L. Biasetto, L. Grigolato, G. Concheri, G. Savio, In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering, *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, No. 101713.
- [24] D.I. Stoia, L. Marsavina, Effect of Aluminum Particles on the Fracture Toughness of Polyamide-based Parts Obtained by Selective Laser Sintering (SLS) *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 18, pp. 163-169.

3. Полазне хипотезе

Основне хипотезе које представљају основу за започињање научно-истраживачког рада у оквиру ове докторске дисертације су:

- Дефинисање нове геометрије епрувете облика прстена изложене затезању допринеће превазилажењу или свођењу на најмању могућу меру проблема који се јављају при одређивању отпорности према лому материјала цевовода применом до сада развијених епрувета и поступака испитивања.
- Примена експериментално-нумеричког поступка омогућиће одређивање вредности параметара линеарно еластичне механике лома и еласто-пластичне механике лома за широк распон димензија нове епрувете.
- Адитивна производња прототипова епрувета ће допринети ефикасном развоју методологије испитивања, помоћног прибора и поступка обраде резултата испитивања.
- Нова епрувета облика прстена изложена затезању ће бити применљива на широк спектар материјала цевовода који се користе у индустрији, како металних тако и неметалних.

4. Научне методе истраживања

- Израда прототипова епрувета облика прстена са једним и два жлеба, као и епрувета за затезање са ивичним концентратором напона (SENT), применом техника адитивне производње (3Д штампања). Користиће се две технике и два материјала: епрувете израђене од полимера PLA (Polilactide acid) израдиће се применом технике FDM (Fused Deposition Modeling), док ће епрувете од полимера PA12 (Полиамид) бити израђене техником SLS (Selective Laser Sintering).

- Израда епрувета облика прстена од челичних шавних и бешавних цеви за цевоводе под притиском (материјали: P235TR1 и P235GH) са једним и два оштра жлеба, као и без жлеба. Поступак ће обухватити сечење прстенова из цеви, уз одговарајућу површинску обраду спољашње и унутрашње површине епрувете. Након израде прстенова (адитивном производњом полимерних, односно сечењем из челичних цеви), биће израђени концентратори напона облика оштрог жлеба. Код полимерних епрувета жлебови ће бити израђени оштрим сечивом, док ће се код челичних прстенова применити две методе: сечење ласером и електроерозија.
- Експериментално испитивање 3Д штампаних прототипова епрувета, тј. полимерних епрувета облика прстена и равних SENT епрувета изложених затезању, применом универзалне машине за испитивање материјала - кидалице (уз коришћење посебног алата за испитивање епрувета облика прстена). При затезним испитивањима свих епрувета биће примењена метода бесконтактнoг одређивања померања и деформација позната као метода корелације дигиталних слика (DIC - Digital Image Correlation). Ова метода, која се често назива и стереометријска, пружа могућност одређивања померања и деформација у сва три координатна правца, што значи да се на узорку могу вршити мерења померања тачака на површини у више праваца, на основу чега се постпроцесирањем одређују деформације. Анализираће се могућност да се раст прслине кроз 3Д штампани полимерни материјал одреди праћењем поља деформација испред тренутног врха прслине.
- Испитивање челичних епрувета облика прстена коришћењем експерименталне поставке претходно припремљене и оптимизоване испитивањем полимерних епрувета: универзалне машине за испитивање материјала на затезање, алата за увођење оптерећења, 3Д оптичког мерног система и софтверског пакета за постпроцесирање измерених резултата, тј. података о деформисању површине епрувете. Приликом испитивања епрувете облика прстена постоји могућност да до интензивнијег раста прслине дође на оној страни која се не снима системом за стереометријско праћење деформисања. Управо могућност коришћења прстена са једним жлебом је важна предност примене епрувета облика прстена оптерећених на затезање у поређењу са онима оптерећеним на савијање; стога, и полимерне и челичне епрувете ће бити израђене са једним или два жлеба, као што је раније наведено.
- Након испитивања, деформисане челичне епрувете ће се подвргнути загревању у пећи на 400 °C, да би се променила боја преломне површине и омогућило лакше препознавање облика коначне прслине. Потом, епрувете ће бити потопљене у течни азот, након чега ће бити поломљене применом ударног оптерећења, да би до коначног отказа дошло механизмом кртог лома. Након ломљења епрувета на два дела урадиће се анализа преломних површина, са основним циљем да се одреди коначна дужина прслине настале механизмом жилавог лома; споменуто загревање узорака пре кртог лома се користи да би се што прецизније одредио коначни фронт прслине.
- Формирање зависности оптерећења (одређеног директним читавањем са кидалице) од геометријских параметара еласто-пластичне механике лома: отварања врха прслине (CTOD - Crack Tip Opening Displacement) и отварање уста прслине (CMOD - Crack Mouth Opening Displacement), одређених применом стереометријског мерног система. Параметар CTOD ће и у експерименталној и у нумеричкој анализи бити одређен применом δ_5 концепта.
- Резултати добијени испитивањем епрувета са једним или два жлеба ће бити основа за формирање кривих отпорности према расту прслине, као једном од кључних резултата. Раст прслине кроз материјал ће бити експериментално одређен применом методе нормализације, која омогућује да се крива отпорности према расту прслине добије

испитивањем једне епрувете (уз обавезно мерење дужине коначне прслине на преломној површини).

- Формирање криве стварни напон - стварна деформација, применом поступка за пост-процесирање резултата добијених мерењем силе и стереометријским мерењем деформација. Размотриће се утицај правца на особине материјала, испитивањем глатких епрувета сечених у уздужном правцу и епрувета облика прстена, имајући у виду да цеви могу имати анизотропне особине. За обимни правац биће коришћене епрувете облика прстена без концентратора напона, које по попречном пресеку одговарају стандардним плочастим епруветама.
- Нумеричка анализа ће бити урађена у програмском пакету за прорачуне методом коначних елемената Simulia Abaqus. У нумеричким моделима ће се користити особине материјала добијене затезним испитивањима: модул еластичности и крива стварни напон - пластична деформација. Примена нумеричких прорачуна представља користан и неопходан алат у развоју поступка за одређивање параметара механике лома за разматрану геометрију, јер ће омогућити одређивање параметара који се не могу добити мерењем нити стандардним поступцима, имајући у виду да је епрувета која се развија у оквиру дисертације нестандардна.
- Развој нумеричких модела епрувета облика прстена ће резултирати одређивањем вредности параметара механике лома за све разматране геометрије: фактора интензитета напона, J интеграла, $CMOD$ и $CTOD$. Одредиће се однос вредности параметара механике лома за епрувету облика прстена и SENT епрувету, што је неопходно како би се квантификовао утицај геометрије при експерименталном одређивању овог параметра.
- Нумеричким прорачунима ће се одредити вредност корекционог фактора η_p , неопходног за одређивање вредности J интеграла у експерименталним испитивањима. Примениће се метода раздвајања оптерећења (Load Separation), која подразумева постпроцесорску анализу кривих сила - померање нападне тачке (или сила - $CMOD$) добијених моделовањем понашања епрувета са различитим дужинама почетног концентратора напона.
- Претходно је наведено да ће се у експерименталном делу истраживања размотрити примена епрувета облика прстена са једним или два жлеба. Применом методе коначних елемената ће се упоредно анализирати напонско-деформационо стање око врха концентратора напона и вредности параметара механике лома за ове две конфигурације.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси:

- Увешће се и верификовати нова епрувета за одређивање отпорности према лому материјала цевовода - епрувета облика прстена изложена затезању (PRNT). Дефинисаће се процедура испитивања ове епрувете.
- Развијен поступак за одређивање вредности фактора интензитета напона и J интеграла на геометрији нестандардне епрувете облика прстена изложене затезању, применом комбинованог експериментално-нумеричког приступа.
- Одређен утицај цилиндричног облика геометрије и услова ограниченог деформисања око врха прслине на резултате, упоредном анализом нове епрувете облика прстена PRNT (са једним и два концентратора напона) и равне епрувете за затезање са ивичном прслином SENT.

- Поступак испитивања епрувета облика прстена ће бити развијен и оптимизован коришћењем прототипова епрувета израђених од полимерних материјала методама адитивне производње, а потом примењен у испитивању епрувета израђених од челичних цеви.
- Кроз рад на дисертацији развиће се методологија за поуздано и поновљиво одређивање отпорности према лому различитих материјала цевовода, у условима оптерећења и напонског стања који одговарају онима у експлоатацији цевовода изложених унутрашњем притиску.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања обухвата: преглед и анализу релевантне литературе, израду полимерних прототипова епрувета техникама адитивне производње, израду епрувета сечењем челичних цеви, експериментално испитивање израђених епрувета (уз примену стереометријског система за праћење деформисања површине), анализа преломних површина - одређивање коначних дужина прслина, формирање зависности оптерећења од отварања уста/врха прслине (CTOD/CMOD) и кривих отпорности према расту прслине, формирање криве стварни напон - стварна деформација, нумеричке прорачуне и анализу, одређивање утицаја закривљености геометрије епрувете, броја концентратора напона и димензија епрувете и концентратора напона на резултате.

Дисертација ће обухватати поглавља: *Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и Дискусија, Закључак и Литература.*

У поглављу *Увод* ће бити дато образложење предмета и циљева истраживања, као и научни допринос.

У поглављу *Теоријски део* биће приказан преглед литературе о испитивању особина материјала цевовода, са посебним освртом на досадашња истраживања којима су предложене нестандартне геометрије епрувета за испитивање отпорности према лому. Такође, дефинисаће се основне теоријске поставке, изрази и величине које ће се користити у свим фазама истраживања.

У поглављу *Експериментални део* биће дат преглед:

- материјала који ће бити испитивани у оквиру рада на дисертацији.
- метода које ће бити коришћене у истраживањима, као и опреме.
- израде епрувета облика прстена, применом техника адитивне производње и сечењем из челичних цеви.
- одређивања затезних особина материјала.
- методологије испитивања отпорности према лому применом епрувета облика прстена.
- формирања и анализе нумеричких модела епрувета.
- поступка израчунавања вредности параметара механике лома на основу резултата нумеричких прорачуна.

Резултати добијени у оквиру рада на дисертацији ће бити приказани и дискутовани у поглављу *Резултати и дискусија*. У поглављу *Закључак* биће сумирани добијени резултати и дати закључци који из њих следе, са освртом на предности нове епрувете и поступка испитивања, погодност примене на различите групе материјала и применљивост у процени интегритета цевовода.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног Комисија сматра да је тема докторске дисертације под насловом “Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању“ коју је предложио Исаак Д. Трајковић, мастер инж. технологије, научно заснована и да представља значајан допринос научној области Технолошко инжењерство за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ужа научна област предложене теме је Инжењерство материјала. Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да кандидату Исааку Д. Трајковићу одобри израду докторске дисертације под наведеним насловом. За ментора докторске дисертације Комисија предлаже др Бојана Међа, ванредног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

Београд, 2. 3. 2022.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Бојан Међо, ванредни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Марко Ракин, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Славиша Путић, редовни професор
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Александар Седмак, професор емеритус
Универзитета у Београду, Машински факултет

.....
Др Милош Милошевић, научни саветник
Иновациони центар Машинског факултета у Београду